16.11.79 г. г. Москва

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ «ГОЛОГРАФИЯ»

Н. И. КИРИЛЛОВ

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ФОТОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ И ПРОЦЕССЫ ИХ ОБРАБОТКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1979

УДК 77.021.123

Кириллов Н. И. Высокоразрешающие фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М.: Наука, 1979. 136 с.

В монографии кратко рассмотрена сущность и применение голографии и основные способы голографирования. Дана характеристика высокоразрешающих фотоматериалов для голографии, их свойств, требуемого и существующего ассортимента. Рассмотрены различные процессы обработки голографических фотоматериалов и получения на них разных видов голограмм. Приведены различные методы испытаний и оценки свойств фотоматериалов для голографии.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся применением голографии в изобразительной технике и для различных научно-технических целей, а также разработкой процессов изготовления и обработки голографических материалов.

Табл. 19, ил. 29, библиогр. 232 назв.

Ответственный редактор

кандидат технических наук
В. А. МАКЕЕВ

© Издательство «Наука», 1979 г.

К $\frac{20503\text{-}381}{055(02)\text{-}79}$ БЗ-95-68-78. 1805000000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Голография, представляющая собой новую, прогрессивную, быстро развивающуюся область в современной науке и технике, начинает переходить из рамок лабораторных исследований в стадию практического применения в изобразительной технике и для различных научно-технических целей, что невозможно без наличия необходимых регистрирующих сред. Основными средами являются особомелкозернистые высокоразрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы, характеризующиеся достаточной светочувствительностью при высоком качестве получаемого на них голографического изображения.

В настоящее время назрела необходимость систематизации и суммирования разбросанных по разным источникам и малодоступных для пользования данных о свойствах и процессах обработки различных галогенидосеребряных голографических фотоматериалов. Подбор и систематизация требуемых данных были связаны с определенными трудностями, вызванными тем, что в большинстве работ оценки свойств и процессов обработки различных фотоматериалов проводились разными методиками.

В главе 1 кратко изложены общие сведения о голографии и ее применении. В следующих двух главах рассматриваются характеристики, свойства и ассортимент голографических фотоматериалов и процессы их обработки. Последняя глава содержит общее описание различных методик испытания и исследования свойств голографических фотоматериалов и контроля процесса их обработки. Цитированная литература включает в себя как монографии и обзорные работы, так и оригинальные исследования и разработки в рассматриваемой области.

К сожалению, в работе не представилось возможным отразить ряд интересных исследований и разработок, опубликованных в последнее время. Хотелось бы надеяться, что это в той или иной мере может быть восполнено самим читателем.

Глава 1

ГОЛОГРАФИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

1.1. Общие сведения

Голография (в переводе с греческого «полная запись») может быть определена, подобно фотографии, как универсальный метод исследования и регистрации разнообразных объектов и явлений живой и неживой природы. Однако в отличие от фотографии в голографии осуществляется полная запись их волнового фронта (и амплитудная, и фазовая), что позволяет получать значительно большую (на два порядка) информацию. Таким образом, создаются возможности для открытия и познания в науке и технике новых, важных, доселе неизвестных объектов и явлений, а в изобразительной технике — получения цветных объемных изображений, которые можно рассматривать в разных ракурсах с созданием полной иллюзии их действительности. Все это выдвигает голографию в новую быстроразвивающуюся прогрессивную область, имеющую весьма важную практическую значимость [1—4].

В принципе световые волны, отображающие объект съемки, можно непосредственно зарегистрировать и в результате получить об объекте полную информацию. Однако для этого необходимы экспозиции, меньшие 10^{-16} с, что технически неосуществимо, так как нельзя получить регистрирующие среды с подобной чрезвычайно высокой светочувствительностью. Чтобы обойти возникающие трудности, в голографии в светочувствительной среде регистрируется интерференционная структура стоячих световых волн, образующихся в результате взаимодействия пучка света, отображающего объект съемки и называемого объектным, и некоторого независимого от него так называемого опорного или референтного пучка. Последний используется затем для восстановления или,

иначе, реконструкции изображения, зарегистрированного в получаемых голограммах.

Голография как двухстадийный процесс записи и воспроизведения объемных интерференционных изображений была открыта в 1948 г. Габором [5—7], теоретически обосновавшим данный процесс и получившим его экспериментальное подтверждение. Однако отсутствие в то время когерентных источников света не давало возможности развиваться голографии, и она, по существу, до начала 60-х годов была забыта. В результате обобщения цветной интерференционной фотографии Липпмана [8—10] и голограммного метода Габора в 1962 г. Денисюк [11—13] открыл более общее явление, в котором отображающие свойства объекта проявляются наиболее сильно, при этом он разработал оригинальный способ голографирования во встречных пучках с восстановлением изображения обычным белым светом. В 1961—1962 гг. Литт и Упатниекс [14, 15] исходя из методов теории связи разработали способ голографирования в сходящихся пучках, значительно усовершенствовав при этом первоначальный метод Габора. Немного позднее, в 1963 г., применив лазер в качестве источника когерентного света при голографировании, эти же авторы [16] положили начало развитию современной лазерной голографии.

Указанные работы являются основополагающими для современной голографии. Из них, по существу, исходят многие усовершенствованные и модернизированные способы получения пропускающих и отражающих голограмм, которыми до последнего времени и ограничивалось развитие голографии.

Как и в случае других больших событий в развитии науки и техники, указанным выше работам в голографии предшествовали некоторые другие работы, в которых разные авторы в той или иной мере подходили к осуществлению принципов голографии с записью различных интерференционных изображений, последующим их восстановлением и т. д. Еще в прошлом веке Липпман [8—10], используя обычные источники света, разработал известный способ получения плоских цветных интерференционных изображений, который может быть назван прообразом современной голографии [17]. Интересен опыт Майкельсона [2, 18], в котором зарегистрированное

на экране (покрытом светочувствительным слоем) волновое поле восстанавливалось при последующем освещении экрана монохроматическим светом. Некоторые старые способы радиолокационного сканирования с записью электрического сигнала также могут быть названы голографическими. Известные опыты Юнга и Винера [3, 19], в которых приводится экспериментальное доказательство образования поперечных и продольных (по отношению к светочувствительному слою) стоячих световых волн, могут служить и для характеристики образования интерференционной структуры изображений, регистрируемых в разных способах голографирования.

В отличие от фотографического изображения, плотность которого в разных его частях различна и соответствует яркостям снимаемого объекта, голографическая запись, или голограмма (реже ее называют интерферограммой), визуально выглядит как равномерное почернение фотографического слоя. Имеющиеся в некоторых случаях на голограммах своеобразные кольца и пятна образуются в результате дифракции света на пылинках зеркал и линз при голографировании и не имеют ничего общего с голографическим изображением. При рассматривании голограмм в микроскоп в них обнаруживается интерференционная микроструктура, в которой информация об амплитуде зарегистрированных излучений отражена в контрасте, а об их фазе — в искривлениях штрихов.

В настоящее время термин «голография» распространяется не только на диапазон видимого света (оптическая голография), но и на невидимые коротковолновые ультрафиолетовые и длинноволновые инфралучи (соответственно ультрафиолетовая и инфраголография), радиоволны (радиоголография), звуковые и ультразвуковые колебания (звуковая или акустическая голография), рентгеновские лучи (рентгеноголография) и др. Он также используется для наименования специализированных применений голографии, например киноголография, цветная голография, телеоголография и т. д.

Для суждения о темпах развития голографии и ее значении в современной науке и технике небезынтересно отметить, что если в первое десятилетие со времени ее открытия (1948—1958 гг.) общее число опубликованных работ по голографии составляло несколько сотен, то в настоящее время ежегодно их публикуется около тысячи,

причем это число непрерывно возрастает. Одновременно существенно расширяется область различных применений голографии и увеличиваются технические средства для ее практического осуществления.

1.2. Способы голографирования

В зависимости от способа голографирования могут быть получены амплитудные пропускающие голограммы, в которых восстанавливаемое изображение рассматривается на просвет, и амплитудные отражательные голограммы, в которых изображение рассматривается при отражении от них света. Можно также получать фазовые пропускающие и фазовые отражательные голограммы, в которых происходит пространственная модуляция фазы регистрируемых стоячих волн за счет изменения коэффициента преломления регистрирующей среды или отражения света от рельефных отражательных голограмм. Получен также новый тип отражательно-пропускающих голограмм с «крестообразными» дифракционными решетками, в которых восстанавливаемое изображение может рассматриваться и на отражение, и на просвет.

В настоящее время описано большое число разнообразных способов голографирования в зависимости от конкретных условий их применения. Вместе с тем все они исходят из основных схем получения пропускающих и отражательных голограмм, первоначально разработанных Габором [5—7], Денисюком [11—13] и Литтом и Упатниексом [14—16].

Использование когерентного лазерного света [16] устранило многие трудности в развитии голографии и разрешило многие проблемы в ее реализации. Теперь голография не мыслится без применения лазеров в качестве источников когерентного света. Лазеры характеризуются одной или несколькими длинами волн монохроматических излучений, длиной когерентности, временной когерентностью, мощностью излучений. При цветном голографировании применяются лазеры с тремя излучениями в разных зонах спектра.

Неотъемлемой частью голографического оборудования являются специальные стабилизирующие установки, задача которых — устранение малейших вибраций голографических деталей во время работы. Основная часть

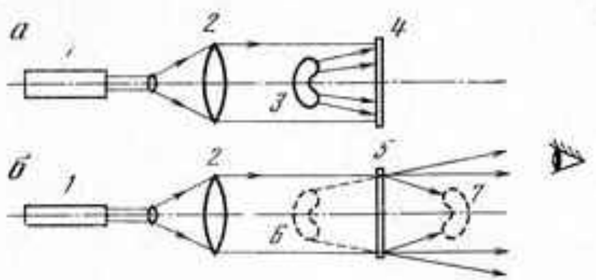


Рис. 1.1. Схемы голографирования прозрачных (фазовых) объектов по Габору [1—5] с расположением источника света и объекта на одной оси (*а*) и восстановления полученных голограмм (*б*)

1 — лазер; *2* — линза; *3* — объект; *4* — фотопластинка; *5* — голограмма; *6* — мнимое изображение; *7* — действительное изображение

этих установок — массивные металлические плиты площадью в несколько квадратных метров и весом около тонны и более, располагаемые на хороших амортизаторах. Кроме лазера, на этой плите устанавливаются различные детали голографирования (кассеты для регистрирующих сред, линзы, зеркала и другие) вместе с деталями для их крепления. Для устранения влияния вибрации голографические установки располагают в подвальных помещениях, вдали от сильного уличного движения, трамвайных и железнодорожных линий, линий метро и т. п.

Рассмотрим некоторые основные способы голографирования.

На рис. 1.1 показана общая схема голографирования прозрачных (фазовых) объектов по Габору [1—5] (с расположением их на одной оси с источником света) в том виде, как она описывается в настоящее время, и дана схема восстановления получаемых голограмм. Недостатком данного способа голографирования является то, что при восстановлении получаемых голограмм образующиеся мнимое и действительное изображения вместе с лучами нулевого порядка находятся на одной оси. Это вызывает взаимные помехи, обусловливающие недостаточное качество восстанавливаемых изображений, и является причиной того, что приведенная схема голографирования не получила распространения.

Как уже отмечалось, Денисюк [11—13] открыл более общее явление, в котором отображающие свойства объек-

та выражаются наиболее сильно. Если освещать объект когерентным светом, то вокруг него образуется волновое (электрическое) поле, представляющее собой интерференционную структуру стоячих волн, формирующуюся в результате взаимодействия между собой падающего опорного и рассеянных объектом лучей. Наиболее целесообразно эту интерференционную микроструктуру регистрировать в том месте, где встречаются падающие и отраженные от объекта лучи на одной оси.

В соответствии с этим Денисюком был разработан оригинальный способ голографирования во встречных пучках (рис. 1.2) с получением отражательных голограмм, которые могут восстанавливаться не только монохроматическим светом, но и обычным направленным солнечным или электрическим белым светом. При этом могут получаться и голограммы цветных изображений. Данный способ и его многообразные видоизменения широко распространены и успешно используются в изобразительной технике и в различных научно-технических целях для получения высокого качества голографического изображения.

Литт и Упатниекс [14—16] разработали способ голографирования с внеосевым расположением обычных диффузно рассеивающих свет объектов и опорного пучка, известный также как способ голографирования в сходящихся пучках (рис. 1.3). При этом получаются высококачественные голограммы без взаимных помех действительного и мнимого изображений при их восстановлении. Приведенная схема может видоизменяться с различным разделением исходного лазерного света, идущего на освещение объекта и используемого в качестве опорного луча. Для достижения оптимальных результатов важное значение имеет необходимый подбор соотношения интенсивностей света в опорном и объектном лучах для конкретных условий голографирования.

Голографирование в сходящихся пучках в различных видоизменениях получило широкое развитие и распространение. Получаемые голограммы могут восстанавливаться не только лазерным светом, при котором проводилось голографирование, но и светом ртутной лампы с соответствующим фильтром.

Хотелось бы отметить, что недавно Кириллов и Любимов [20, 21] разработали процесс голографирования с применением зеркальных фотослоев, в результате которого

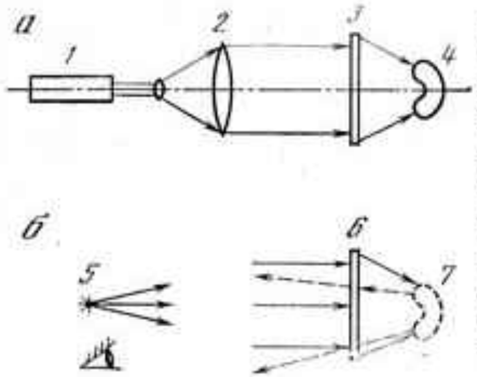


Рис. 1.2. Схемы голографирования диффузно отражающих объектов во встречных пучках по Денисюку [11—13] (*а*) и восстановления полученных голограмм (*б*)

1 — лазер; *2* — линза; *3* — фотопластинка; *4* — объект; *5* — источник белого света; *6* — голограмма; *7* — восстановленное мнимое изображение

получается новый тип отражательно-пропускающих голограмм с восстановлением изображения и в отраженном, и в проходящем свете, в том числе и в направленном белом свете. В таком процессе создаются наиболее простые и благоприятные условия формирования и регистрации интерференционной структуры стоячих волн при минимально возможных требованиях к когерентности источников света и жесткости (виброустойчивости, амортизации) голографических установок, поскольку падающие на

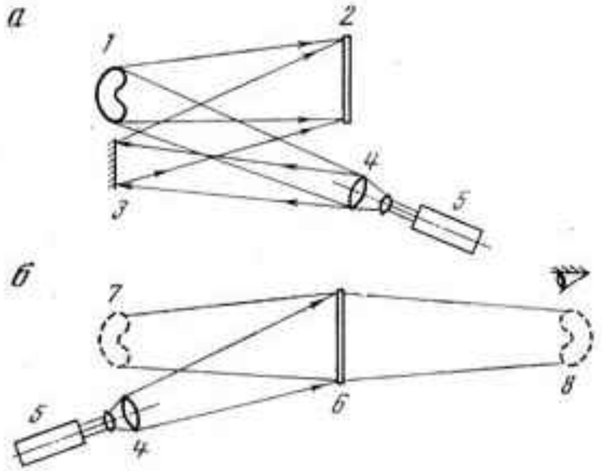


Рис. 1.3. Схемы голографирования в сходящихся пучках по Литту и Упатниексу [14—16] (с внеосевым опорным пучком) (*а*) и восстановления полученных голограмм (*б*)

1 — объект; *2* — фотопластинка; *3* — зеркало; *4* — линза; *5* — лазер; *6* — голограмма; *7*, *8* — мнимое и действительное изображения соответственно

фотопластинку лучи по существу интерферируют «сами с собой».

На всех деталях различных способов и условий голографирования здесь не представляется возможным остановиться. Вместе с тем нельзя не указать, что важной проблеме связи условий голографирования с интерференционной микроструктурой получаемых голографических изображений, особенно цветных, пока уделяется недостаточное внимание. В этом отношении не теряют научного и практического интереса старые микрофотографические исследования Лемана [8, 22], в которых он изучал интерференционную микроструктуру стоячих световых волн, регистрируемых в липпмановских цветных фотографиях при разных условиях их образования различными излучениями. Ценкер [8, 23] первым теоретически обосновал образование стоячих световых волн в цветных интерференционных фотографиях и их большую значимость в восприятии цветовых ощущений. Позднее эти теоретические данные были подтверждены экспериментально в известном опыте Винера (1889 г.) [3, 19].

Из микрофотографий Лемана [8, 9, 22] следует, что при регистрации монохроматического цвета расстояние между прослойками проявленного серебра во всей толще эмульсионного слоя одинаково и равно (с учетом набухания слоя) половине длины образующихся стоячих волн. При гомогенной смеси двух спектральных излучений регистрируется периодически повторяющаяся пульсация стоячих волн, подобная известному явлению «биения» в акустике, когда при ударении двух звуковых тонов слышится третий звук, соответствующий суммарной длине волны. Наконец, когда регистрируется смесь гетерогенных (не спектральных) цветов, то происходит быстрое периодическое затухание зарегистрированной интенсивности света. Полученные экспериментальные результаты могут представлять интерес для суждения о микроструктуре различных цветных голографических изображений.

1.3. Регистрирующие (светочувствительные) среды для голографии

Без требуемых регистрирующих сред немыслимо практическое применение голографии. При этом основными, как и в фотографии, пока являются галогенидосеребряные

высокоразрешающие фотоматериалы, подробно рассматриваемые в следующих главах. Здесь же нельзя не остановиться на общей характеристике несеребряных и необычных регистрирующих сред, имеющих самостоятельное значение. Им посвящено много монографий и обзоров [2, 3, 24—32], в которых приводятся ссылки на многочисленные оригинальные работы, рассматриваются характеристики и свойства различных материалов, их применение и т. д.

Особый интерес к несеребряным и необычным регистрирующим средам объясняется тем, что большинство из них не требует какой-либо мокрой обработки после экспонирования, а при использовании некоторых из этих материалов изображение получается сразу после экспонирования в реальном масштабе времени. Кроме того, некоторые так называемые обратимые регистрирующие среды могут использоваться многократно после стирания записанного изображения. Такими свойствами не обладают галогенидосеребряные высокоразрешающие фотоматериалы, и поэтому во многих важных голографических процессах они не могут заменять указанные несеребряные и необычные регистрирующие среды. Однако недостатками последних являются в большинстве случаев небольшая светочувствительность, измеряемая десятками — сотнями тысяч эргов на квадратный сантиметр, а также ограниченная спектральная светочувствительность, в основном к ультрафиолетовой и коротковолновой видимой части спектра (примерно до длин волн около 550 нм). Однако это не может повлиять на целесообразность применения различных дешевых несеребряных регистрирующих сред в процессах копирования и массового размножения голограмм.

В настоящее время существует весьма большое число самых разнообразных несеребряных и необычных регистрирующих сред, определяемое светочувствительностью различных классов неорганических и органических соединений, а также разными видами записи изображений в физических системах. Большое многообразие различных регистрирующих сред целесообразно разделить [27] на о б р а т и м ы е, в которых зарегистрированное изображение может затем рассасываться (стираться) и полученный регенерированный материал подвергаться повторному (многократному) использованию, и н е о б р а т и м ы е, которые этими свойствами не обладают. Многие обратимые регистрирующие среды характеризуются получением изображения сразу после экспонирования. Они могут иметь важное применение для голографирования в реальном масштабе времени, оперативной памяти и т. д.

Обратимые регистрирующие среды

Фотохромные материалы. Обратимое изменение поглощения света или цвета регистрирующей среды после экспонирования, происходящее под действием тепла или длинноволновых излучений, называется фотохромизмом. Существует большое число различных органических (чаще всего из класса спиропиронов) и неорганических фотохромных соединений, которые используются в виде полимерных пленок и стекол. Их энергетическая светочувствительность небольшая (от сотых долей до нескольких джоулей на квадратный сантиметр) при высокой разрешающей способности (до 3000—5000 лин/мм и более), но небольшой дифракционной эффективности (несколько десятых долей процента). Спектральная светочувствительность органических фотохромных материалов может доходить до длинноволновой части спектра. Находят применение различные жидкие фотохромные материалы.

Неорганические фотохромные стекла содержат микрокристаллы галогенидов серебра диаметром около 10—100 нм. Наличие в них йодистого серебра расширяет спектральную светочувствительность до длин волн примерно 550 нм. Изменение оптических плотностей в фотохромных стеклах после экспонирования значительно меньше, чем в органических фотохромных материалах, и поэтому они имеют существенно большую толщину (до нескольких миллиметров). Изображение на многих фотохромных материалах появляется сразу же после экспонирования. Продолжительность хранения зарегистрированной информации — от нескольких минут до нескольких дней. Явлением фотохромизма обладают многие другие кристаллы, например кристаллы бромистого и хлористого калия, предварительно активированные гамма-излучением.

Электрооптические или сегнетоэлектрические кристаллы типа ниобата лития, стронция или бария, титанатов висмута, бария и других позволяют получать очень толстослойные голограммы и проводить на них голографирование под разными углами и с большой плотностью. В кристалле

размером 15×15×15 мм может быть зарегистрировано 1000 голограмм. Разрешающая способность очень высокая (до 4000—5000 линий и, видимо, более) при дифракционной эффективности от нескольких единиц до нескольких десятков процентов и энергетической светочувствительности, измеряемой от десятых долей до нескольких сот джоулей на квадратный сантиметр. Электрическое поле может модулировать показатель преломления, что достигается сканированием электрического пучка с записью фазовых голограмм. Стирание зарегистрированной голограммы может осуществляться при ее нагревании или при действии света.

Фототермопластические (полупроводниковые) материалы представляют собой сложную физическую систему, состоящую из слоев термопластика, фотопроводника и прозрачного проводника. Перед экспонированием фототермопластические материалы очувствляются путем зарядки поверхностного слоя коронным разрядом. При экспонировании образуется скрытое изображение, представляющее собой пространственно модулированный потенциальный рельеф на поверхности фотопроводника. Проявление скрытого изображения происходит под действием тепла с образованием рельефной фазовой голограммы. При сильном нагревании полученный рельеф стирается и материал может использоваться повторно (многократно). Спектральная светочувствительность может широко изменяться, начиная от ультрафиолетовой области вплоть до длинноволновой части видимого спектра ($\lambda=700$ нм). Разрешающая способность достигает высоких значений (нескольких тысяч линий на миллиметр) при энергетической светочувствительности в несколько тысяч эрг на квадратный сантиметр и дифракционной эффективности до нескольких десятков процентов. В последнее время получены термопластические материалы со светочувствительностью, превышающей светочувствительность галогенидосеребряных высокоразрешающих фотоматериалов.

Магнитные пленки, халькогенидные стекла, жидкие кристаллы. Обычные ферромагнитные пленки, применяемые для записи звука и изображений, обладают недостаточной разрешающей способностью. Поэтому для регистрации голограмм используются более мелкозернистые и высокоразрешающие магнитные пленки двух типов: на основе никеля — железа и марганца — висмута. Они характеризуются достаточной светочувствительностью, но их дифракционная эффективность небольшая (тысячные, сотые доли процента).

Большое внимание уделяется применению для записи голограмм многокомпонентных стеклообразующих материалов, так называемых халькогенидных стекол. Голограммы на них могут получаться в реальном масштабе времени с высокой разрешающей способностью и дифракционной эффективностью до 70—80%, но их светочувствительность на несколько порядков меньше галогенидосеребряных высокоразрешающих фотоматериалов; стирание записанной голограммы проводится при нагревании.

Для некоторых условий голографирования представляют интерес так называемые жидкие кристаллы или жидкокристаллические слои; их разрешающая способность и продолжительность хранения записанной голограммы незначительны, но они характеризуются достаточной светочувствительностью (несколько тысяч эрг на квадратный сантиметр).

Для различных условий голографирования используются и многие другие обратимые регистрирующие среды, к которым относятся различные электрохимические системы, эвапорографические материалы, а также среды с термографическими и рельефографическими процессами.

Необратимые регистрирующие среды

Хромированная желатина при экспонировании избирательно задубливается с различной степенью набухания и растворимости. В результате этого при обработке теплой водой на поверхности слоя хромированной желатины образуется рельефное изображение и формируются фазовые голограммы. В другом способе подобные же фазовые голограммы получаются при быстрой дегидратации спиртом (после экспонирования) и последующем набухании слоя хромированной желатины. В обоих случаях достигается высокая дифракционная эффективность (для толстослойных решеток 90%) и высокая разрешающая способность получаемых голограмм (более 5000 лин/мм). Однако светочувствительность хромированной желатины небольшая (сотые доли джоуля на квадратный сантиметр) и относится к видимой части спектра с длиной волны до 520 нм. Слои хромированной желатины успешно использовались

для получения высокого качества липпмановских цветных интерференционных фотографий.

Фоторезисты представляют светочувствительные полимерные соединения, в которых подобно хромированной желатине под действием света изменяется их растворимость в определенных растворителях, в результате чего получаются рельефные фазовые голограммы с высокой дифракционной эффективностью (несколько десятков процентов), но небольшой светочувствительностью. Наличие хорошего поверхностного рельефа дает возможность использовать фоторезисты в качестве печатающих матриц для размножения голограмм после покрытия гальваническим путем рельефной матрицы тонким слоем никеля.

Диазотипные материалы основаны на светочувствительности различных диазосоединений. Они характеризуются высокой разрешающей способностью (3000 лин/мм и более) и дифракционной эффективностью для амплитудных голограмм порядка 10%. Малая светочувствительность диазотипных материалов обусловливает их пригодность лишь для копирования голограмм. Экспонированный материал подвергается сухой обработке.

Фотополимерные слои толщиной 10—20 мкм основаны на светочувствительности разных соединений (акрилатов натрия, свинца и других с разной сенсибилизацией), имеют максимальную спектральную светочувствительность в красной области спектра, но незначительную энергетическую светочувствительность (1—30 Дж/см²); разрешающая способность их превышает 1000 лин/мм; дифракционная эффективность — несколько десятков процентов.

Полупроводниковые материалы, основанные на светочувствительности йодистого свинца на слое алюминия, характеризуются способностью восстанавливать голограммы в процессе их записи. Они имеют небольшую энергетическую светочувствительность (0,02—0,2 Дж/см²) в диапазоне длин волн 400—480 нм и разрешающую способность более 1000 лин/мм.

Металлические пленки, слои со свободными радикалами и многие другие соединения, характеризующиеся простой обработкой после экспонирования и получением голограмм в реальном масштабе времени, могут находить применение при разных условиях голографирования.

Приведенные выше данные хотя и являются весьма

общими и ограниченными, могут указывать на некоторые специфические свойства различных несеребряных и необычных регистрирующих сред, которые не могут быть присущи галогенидосеребряным высокоразрешающим фотоматериалам и которые могут обусловливать их успешное применение для многих важных условий голографирования. Пригодность тех или иных рассмотренных сред в конкретных условиях голографирования, естественно, требует более детального с ними ознакомления по оригинальным работам.

1.4. Применение голографии и ее методов

Подобно фотографии голография и ее методы могут использоваться как в изобразительной технике, так и для самых разнообразных научно-технических целей, но с существенным расширением при этом технических возможностей и резким увеличением объема получаемой информации, что невозможно в обычной фотографии.

В отличие от обычных стереоскопических изображений полученные в голографии монохроматические и цветные объемные изображения можно рассматривать в разных ракурсах, что создает полную иллюзию действительности голографируемых объектов. Тем самым резко расширяются эмоциональные возможности воздействия на зрителя как обычных неподвижных, так и движущихся изображений в кинематографии. Это указывает на большие возможности применения голографии в рекламном деле, для изготовления сувениров, копий художественных ценностей, наглядных учебных пособий, выставочных экспонатов, при передаче изображений по телевидению и многое другое.

Оригинальностью и простотой отличается способ размножения миниатюризированных фильмов путем их кодирования и затем печати (штамповки с голографических матриц) на поливиниловую пленку и показом полученных копий в телевизорах с помощью специальных приставок.

Весьма интересны и эффективны многочисленные применения голографии для самых различных научно-технических целей. К ним относятся голографические методы распознавания образов и голографическая память, голографирование в реальном масштабе времени, имеющие важное значение во многих областях, в том числе в электрон-

но-вычислительной технике и автоматическом управлении. Применение голографической интерферометрии открыло возможность неразрушающего контроля качества различных изделий, обнаружения в них дефектов. Использование импульсных лазеров позволяет просто регистрировать быстропротекающие процессы, исследовать вибрацию различных деталей и т. д. Голографическая фильтрация может использоваться для улучшения качества изображений. Весьма важно применение голографических методов обработки информации и многое другое.

Кроме практического применения обычной оптической голографии в видимом диапазоне света, не меньшую значимость имеют и разные приложения ее в невидимой длинноволновой и ультракоротковолновой областях спектра. В научно-техническом отношении важны также различные приложения радиоголографии, звуковой и ультразвуковой голографии, рентгеноголографии и т. д.

Глава 2

ГАЛОГЕНИДОСЕРЕБРЯНЫЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ФОТОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

2.1. Общие данные

Фотоматериалы, или, иначе, регистрирующие среды, для голографии должны обеспечивать полную запись на них тонкой интерференционной микроструктуры отображения волнового фронта (поля) объекта голографирования. Следовательно, они должны быть особомелкозернистыми и высокоразрешающими, поскольку обычные, в том числе и мелкозернистые, галогенидосеребряные фотоматериалы, для этого непригодны, так как не позволяют регистрировать высокие пространственные частоты голографического изображения. Это указывает на то, что особомелкозернистые высокоразрешающие фотоматериалы для голографии должны создавать новую наиболее высокодисперсную группу в общем ассортименте галогенидосеребряных кинофотоматериалов и характеризоваться рядом специфических свойств.

Исходя из имеющихся данных и перспектив развития голографии, можно заключить, что непосредственное голографирование в основном должно проводиться с использованием высокоразрешающих галогенидосеребряных фотоматериалов, обладающих наиболее высоким уровнем светочувствительности при высоком качестве получаемого изображения. Вместе с тем в ряде специфических процессов голографирования, например при голографировании в реальном масштабе времени, в системах оперативной памяти, могут применяться и некоторые несеребряные и необычные регистрирующие среды. Разные процессы копирования голограмм и их массовой печати (размножения) наиболее целесообразно проводить с помощью более дешевых несеребряных регистрирующих сред, применяя простые и быстрые процессы обработки.

В результате проведенных в последние годы исследований и разработок отечественной и зарубежной химико-фотографической промышленностью разработан и изготавливается ряд высокоразрешающих фотоматериалов для голографии, что позволяет в известной мере удовлетворять потребности в них голографических исследований. С использованием различных высокоразрешающих фотоматериалов связаны многие успехи в развитии голографии, в том числе при получении трехмерных панорамных, крупноформатных и цветных голограмм при голографировании в сходящихся и встречных пучках, что демонстрировалось на различных отечественных и международных выставках. Вместе с тем надо иметь в виду, что без дальнейших исследований и разработок высокоразрешающих фотоматериалов не может мыслиться развитие и практическая реализация голографии и ее методов. Представляется, что наиболее оптимальные режимы голографирования могут быть разработаны лишь в сочетании с использованием соответствующих регистрирующих сред и процессов их обработки.

В опубликованных монографиях [1—4 и др.], обзорах и статьях [33—39] приводятся интересные данные о влиянии свойства материалов и процесса их обработки на качество получаемых голограмм. Сложность разработки новых и усовершенствованных высокоразрешающих фотоматериалов обусловливается тем, что их оптимальные голографические характеристики достигаются при некоторых оптимальных условиях экспонирования и обработки фотоматериала, определение которых связано с проведением трудоемкого эксперимента. При этом необходимые тонкие методики голографических и других испытаний фотоматериалов пока также довольно сложны. Все это не только затрудняет, но в некоторых случаях и не позволяет сделать интересующие обобщения работ разных авторов без дополнительного проведения сложных и малодоступных сравнительных испытаний.

Небезынтересно остановиться на некоторых теоретических данных, в которых математически обосновываются голографические требования к фотоматериалам и условия последующего восстановления голограмм.

Согласно теории Когельника [3, 40, 41], при идеальных условиях дифракционная эффективность разных голограмм может достигать 100%. Вместе с тем она различна для разных видов пропускающих и отражательных, амплитудных и фазовых голограмм. Де Бельдер [42] рассматривает качественные критерии голографических фотоматериалов и математически анализирует влияние изменения их контраста, дисперсионных характеристик и шумов на яркость восстанавливаемого изображения в получаемых голограммах. Лин [3, 43] математически обосновывает условия идеального восстановления голографического изображения, методы оценки свойств и характеристик идеального фотоматериала для записи голограмм, сопоставляя их с обобщенными характеристиками реальных фотоматериалов. Гара и Йю [44] анализируют влияние толщины эмульсионного слоя на качество восстанавливаемого изображения и приходят к выводу, что для объекта, расположенного на расстоянии 1 м от голограммы, погрешность воспроизведения изображения составляет 0,001 отн. ед. при радиусе кривизны изменения толщины эмульсионного слоя, равном 500 м; эти данные могут примерно характеризовать и реальные голографические фотоматериалы.

Суханов [45], исследуя связь структуры трехмерного объекта со структурой получаемых трехмерных голограмм и восстанавливаемого изображения, приводит их математическую интерпретацию, при этом делает важные выводы о содержании серебра в используемых фотоматериалах, их обработке, влиянии экспозиции на дифракционную эффективность получаемых голограмм. Барбанель и Крупицкий [46] в результате математического анализа поставленных выше вопросов приходят к выводу, что на одном и том же фотоматериале не представляется возможным достигнуть оптимума всех параметров голограмм, получаемых при различных условиях голографирования. Они рекомендуют разделить фотоматериалы на три вида: 1) для регистрации слабого сигнала, 2) для достижения максимальной дифракционной эффективности, 3) для обеспечения большого динамического диапазона.

Перечень подобных работ в рассматриваемой области можно было бы продолжить. Вместе с тем из общего содержания указанных работ следует, что применяемый в них голографический подход к разрешению поставленных задач во многом недоступен для непосредственного практического использования разработчиками голографических фотоматериалов.

2.2. Дисперсионные и резольвометрические характеристики

Дисперсионные и резольвометрические характеристики фотоматериалов во многом взаимно связаны между собой. Однако они являются самостоятельными и требуют применения различных методик для их определения. Исходные данные о требуемых дисперсионных характеристиках фотоматериалов необходимы для установления режимов первого (физического) созревания используемых фотографических эмульсий, когда происходит формирование их твердой фазы. Резольвометрическая же характеристика фотоматериалов, в том числе и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), необходима для суждения о возможности регистрации и передачи различных мелких деталей.

На основании литературных данных [47—51] можно считать, что средний диаметр эмульсионных зерен в различных «беззернистых» липпмановских эмульсиях и фотоматериалах составляет примерно от 15—20 до 25—30 нм. Средний же диаметр зерен в различных современных голографических фотоматериалах изменяется примерно от 5—10 до 90—100 нм [33, 47—64 и др.] Наименьший размер зерен соответствует отечественным особозернистым «прозрачным» фотоматериалам ПЭ-1 и ПЭ-2 ($d_{ср}=5\div\div 12$ нм) [52—54].

Исследования Денисюка и Протас [49] показали, что интерференционная картина стоячих световых волн может быть зафиксирована тогда, когда диаметр эмульсионных зерен фотослоев составляет не более одной четверти расстояния между их узлами, т. е. 70 нм для $\lambda=546$ нм, но наилучшие результаты достигаются при уменьшении этого расстояния до 30 нм. Нассенштейн, Деден, Метц и др. [63] указывают, что для регистрации тонкой интерференционной структуры световых излучений диаметр эмульсионных зерен фотоматериала должен быть много меньше 0,1 мкм.

Рассмотрев наиболее жесткие условия голографирования во встречных пучках, Васильева и Кириллов [58] пришли к выводу, что для этих условий наиболее высокое качество голографического изображения может быть получено, когда в эмульсионном слое отсутствует рассеяние

света при голографировании, т. е. когда он является практически прозрачным. Отсюда размер зерен в таких «прозрачных» фотоматериалах должен находиться вблизи границы размеров частиц истинных (прозрачных) и коллоидных (опалесцирующих) растворов, иначе говоря, измеряться несколькими нанометрами. Этот вывод был подтвержден при получении голограмм во встречных пучках на отечественных «прозрачных» фотоматериалах ПЭ-1 и ПЭ-2.

Как следует из рассмотренных данных, в разных способах голографирования в сходящихся пучках требования к дисперсионным характеристикам фотоматериалов могут уменьшаться, что происходит за счет уменьшения угла между объектным и опорным лучами. Это создает возможность повышения светочувствительности используемых фотоматериалов. Вместе с тем наиболее высокое качество голографического изображения все же получается при применении «прозрачных» фотоматериалов.

Как и в обычной фотографии, качество фотоматериалов в голографии часто характеризуется их разрешающей способностью, представляющей собой предельно разрешаемое фотоматериалом число линий на 1 мм, определяемое с помощью штриховой миры при наблюдении в микроскоп с небольшим увеличением. Ориентировочно можно считать, что для фотоматериалов с «прозрачным» эмульсионным слоем разрешающая способность составляет не менее 10 000 лин/мм. Нельзя не отметить, что приводимые разными авторами численные значения разрешающей способности разных фотоматериалов зависят от используемой методики ее определения.

Для более полного суждения о качестве голографических фотоматериалов наряду с разрешающей способностью все чаще начинает применяться их частотно-контрастная характеристика, позволяющая судить, в какой мере в используемых фотоматериалах могут передаваться различные пространственные частоты изображений. Для отечественных голографических фотоматериалов первые ЧКХ были определены для высокоразрешающих фотопластинок Микрат-ВР и фотопленки Микрат-900 [64], фотопластинок ВР и ИЭА-1 [51] и ПЭ-1 [65]. Недавно были опубликованы результаты интересного исследования [66] по определению ЧКХ высокоразрешающих фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70, 10Е70 и нового голографического фотоматериала Пан-300.

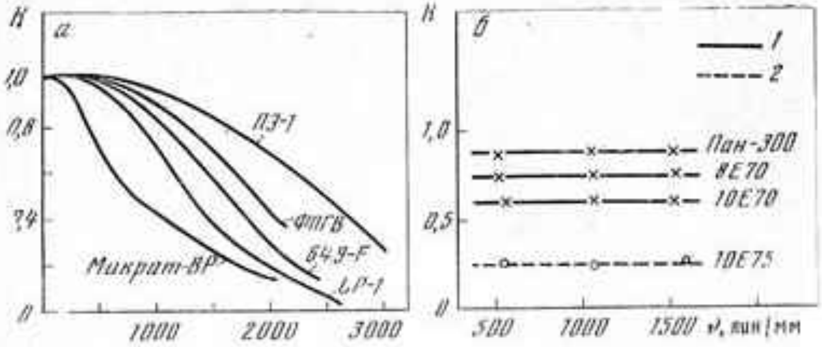


Рис. 2.1. Частотно-контрастные характеристики высокоразрешающих фотоматериалов Микрат-ВР, LP-1, 649F, ФПГВ [2] и ПЭ-1[65] (*а*) и голографических фотоматериалов Агфа-Геверт [66] (*б*)

б — длина излучения источника λ_0 равна: *1* — 647, *2* — 476 нм

На рис. 2. 1 приведены ЧКХ различных отечественных и зарубежных голографических фотоматериалов. Можно видеть огромную разницу в передаче мелких деталей различными фотоматериалами, что обусловливает получение на них разного качества голографического изображения. Приведенные на рис. 2. 1, *б* данные, к сожалению, не охватывают высоких пространственных частот и поэтому не могут указать, при какой частоте начинается заметный спад ЧКХ. При источниках излучений с меньшей длиной волны (пунктирная кривая), как и можно было ожидать, наблюдается заметное понижение ЧКХ.

В связи со сложностью определения ЧКХ методами голографической резольвометрии резольвометрическая характеристика голографических фотоматериалов обычно ограничивается оценкой их разрешающей способности.

Представляет интерес рассмотреть некоторые данные по расчету требуемой разрешающей способности фотоматериалов для разных условий голографирования.

Васильева и Кириллов [58, 59] рассчитали необходимую разрешающую способность фотоматериала для наиболее жестких условий голографирования во встречных пучках. Требуемая для данных условий передача максимально возможных пространственных частот определялась для наиболее простого случая интерференции лучей от двух точечных источников света, когда угол α между встречными пучками равен 180°, или $\sin(\alpha/2)=1$. Полагая, что необходимая разрешающая способность фотоматериала $R_{встр}$ должна быть несколько больше требуемой передачи максимальной пространственной частоты ν_{max}, будем иметь

$$R_{встр} > 2n/\lambda, \qquad (2.1)$$

где λ — длина регистрируемой волны света; n — коэффициент преломления фотослоя (для обычного желатинового слоя $n=1,5$).

Можно считать, что для достаточно четкой передачи максимальных пространственных частот разрешающая способность фотоматериала должна превышать их не менее чем на 20%. Отсюда были вычислены значения необходимой разрешающей способности фотоматериала, приведенные в табл. 2.1 [58, 59].

Таблица 2.1

Разрешающая способность фотоматериала, необходимая для голографирования во встречных пучках при разной длине волны излучений [58, 59]

λ, нм	ν_{max}, лин/мм	$R_{встр}$, лин/мм	
		ν_{max} + 20%	округленно
694	4400	5280	5000
633	4800	5700	6000
510	5950	7150	7000
488	6200	7440	7500
400	7600	9120	10000

Из приведенных в табл. 2.1 данных можно видеть, что требования к разрешающей способности фотоматериала при регистрации во встречных пучках структуры стоячих волн при разных длинах волн видимого света ($\lambda=400\div$ $\div700$ нм) резко изменяются — в 2 раза. При голографировании с импульсным рубиновым (красным) лазером ($\lambda=$ $=694$ нм) она должна быть минимальной — ~5000 лин/мм, для наиболее же коротких (фиолетовых) излучений ($\lambda=$ $=400$ нм) — максимальной (10 000 лин/мм).

Для цветного голографирования, когда могут регистрироваться все видимые лучи света ($\lambda=400\div700$ нм),

требуемая разрешающая способность фотоматериала определяется регистрацией коротковолновых (фиолетовых) лучей и должна составлять не менее 10 000 лин/мм. Отсюда можно получить интересные данные о фактической разрешающей способности некоторых «прозрачных» фотоматериалов. Из того что на «прозрачных» фотопластинках ПЭ-1-633 [52] были получены цветные импульсные голограммы в трехмерной среде с хорошей передачей фиолетового цвета [67, 68], следует, что рарешающая способность этих фотопластинок составляет не менее 10 000 лин/мм Подобной же высокой разрешающей способностью можг характеризовать и недавно разработанные «прозрачны фотопластинки ЛОИ-2 с дифракционной эффективност во встречных пучках, достигающей 50% [60—62].

Из сопоставления указанных фактических данных с р зультатами измерений по недавно опубликованной [69] м тодике определения разрешающей способности голограф ческих фотоматериалов путем экстраполяции результат получаемых при измерениях проекционным методом с м рой пониженного контраста, следует, что эта методика да заниженные результаты. Разрешающая способность «пр зрачных» фотопластинок ПЭ-1-633 и подобных им опь ных фотопластинок по этой методике составляет 680(8000 лин/мм; в то же время она немного меньше (око 6000 лин/мм) для достаточно мутных, а следовательн значительно менее дисперсных фотопластинок Агфа-Г верт 10Е75, ОРВО LP-1, Кодак 649F и др. Более близкие к действительным величины разрешающей способности разных фотоматериалов были получены позднее [70] при применении интерференционного метода с экстраполяцией результатов измерений интерференционных полос с пониженным контрастом.

Расчет требуемой разрешающей способности фотоматериала при голографировании в сходящихся пучках можно провести аналогичным образом. В простейшем случае при регистрации структуры стоячих волн, образующихся при интерференции двух симметричных лучей от точечных источников света,

$$R_{\text{сход}} > 2n \sin(\alpha/2)/\lambda. \qquad (2.2)$$

Отсюда можно видеть, что при уменьшении угла α между интерферирующими лучами требования к разрешающей способности фотоматериала при голографировании в

сходящихся пучках понижаются, поскольку при этом $\sin(\alpha/2)$ уменьшается (стремится к нулю), и становятся существенно меньшими, чем при голографировании во встречных пучках. Обычно для разных условий голографирования в сходящихся пучках используются фотоматериалы с разрешающей способностью примерно от 1500—2000 до 3000—5000 лин/мм. При уменьшении разрешающей способности фотоматериала, естественно, повышается его светочувствительность, но понижается качество олучаемого голографического изображения.

Приведенные выше расчеты являются упрощенными, ли значительно усложняются, если учитывать различные нкретные условия голографирования [2]. Вместе с тем лученные результаты о существенно различной разреиющей способности фотоматериала для разных условий лографирования остаются справедливыми. Если при голографировании необходимо регистрировать низкие пространственные частоты, то могут применяться обычные фоматериалы с разрешающей способностью в несколько т линий на миллиметр и даже меньше, например пленки анхром 18, Кодак 3Х и др. В данном случае выдержка и экспозиции может составлять десятые — сотые доли кунды, что бывает важно для достижения требуемого рельтата в некоторых условиях голографирования. Сравниельно невысокие требования к качеству фотоматериала предъявляются в голографической интерферометрии. Следует, однако, иметь в виду, что это отнюдь не изменяет общего положения о применении в голографии особомелкозернистых высокоразрешающих фотоматериалов и относится лишь к некоторым специфическим условиям голографирования.

Рассмотренные выше данные позволяют сделать общий вывод, что при более высоких дисперсионных и резольвометрических характеристиках голографических фотоматериалов качество получаемых на них голограмм улучшается, но при этом светочувствительность понижается. Вместе с тем исследования Ермолаева, Кракау, Протас и др. [60] показывают (табл. 2.2), что при повышении относительной степени дисперсности эмульсий светочувствительность, как и обычно, закономерно уменьшается, а разрешающая способность (определялась косвенно, путем экстраполяции проводимых измерений [69]) и дифракционная эффективность получаемых отражательных голо-

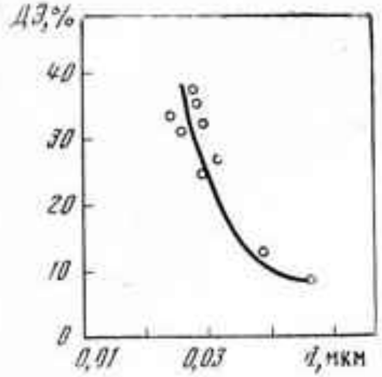


Рис. 2.2. Влияние дисперсности особомелкозернистой голографической эмульсии ЛОИ на дифракционную эффективность получаемых отражательных голограмм [62]

грамм сначала повышаются, а затем сохраняются постоянными. Однако более поздние данные этих же авторов [62] показывают, что с уменьшением среднего диаметра эмульсионных зерен этого же типа особомелкозернистых эмульсий дифракционная эффективность получаемых на них отражательных голограмм непрерывно возрастает (рис. 2.2). Это согласуется с данными для прозрачных фотоматериалов типа ПЭ.

В заключение надо указать, что в отличие от фотографии в голографии получаемое при восстановлении изображение «собирается» со всей площади голограммы, поскольку каждый ее небольшой участок способен восстановить изображение всего объекта. Отсюда понятно, что меньший участок голограммы будет восстанавливать и меньший участок волнового фронта (поля) объекта голографирования. Если данный участок будет очень небольшим, то качество восстановленного изображения ухудшится, станет возникать характерная зернистая структура, изображение будет представляться нерезким, как бы с малой разрешающей способностью. Однако такое кажущееся повышение зернистости и уменьшение разрешающей способности голографического изображения никак не относится к меньшим дисперсионным и резольвометрическим характеристикам фотоматериала, что на первый взгляд можно было бы предположить, если бы голограммы различного размера рассматривались в отдельности.

Таблица 2.2

Влияние дисперсности высокоразрешающей эмульсии на светочувствительность $S_{D_0+0,2}$, разрешающую способность R и дифракционную эффективность (ДЭ) голограмм во встречных пучках [60]

Относительная дисперсность по плотности для λ=410 нм	$S_{D_0+0,2}$	R, лин/мм (K=1)	ДЭ, %
0,250	0,0020	6000	10
0,155	0,0006	7000	35
0,148	0,0005	8000	35
0,137	0,0004	8000	36

2.3. Фотографическая и голографическая светочувствительность, сенситометрические показатели

Общая светочувствительность галогенидосеребряных кинофотоматериалов оценивается по действию на них белого света обычно по критерию образования некоторой небольшой оптической плотности (0,1—0,2) над уровнем вуали. Однако для голографии имеет значение не общая, а спектральная светочувствительность фотоматериала по отношению к монохроматическим излучениям различных лазеров. Такая монохроматическая светочувствительность голографических фотоматериалов обычно называется энергетической и выражается в эрг/см^2, Дж/см^2 или мДж/см^2 при разных критериях оценки (наиболее часто по $Д$=0,5). При уменьшении этой величины светочувствительность фотоматериала увеличивается, а при ее увеличении уменьшается.

На основании имеющихся данных [2, 3, 33—35, 51—57] энергетическая светочувствительность различных голографических фотоматериалов изменяется примерно от нескольких единиц до нескольких тысяч (и более) эрг на квадратный сантиметр при разрешающей способности, равной соответственно 1000—1500 и 8000—10 000 лин/мм и более.

Представление об энергетической светочувствительности голографических фотоматериалов можно получить из кривых спектральной светочувствительности, получаемых с помощью спектросенситометрических испытаний. Приводимые на рис. 2.3 сравнительные кривые спектральной светочувствительности S_λ разных фотоматериалов [71]

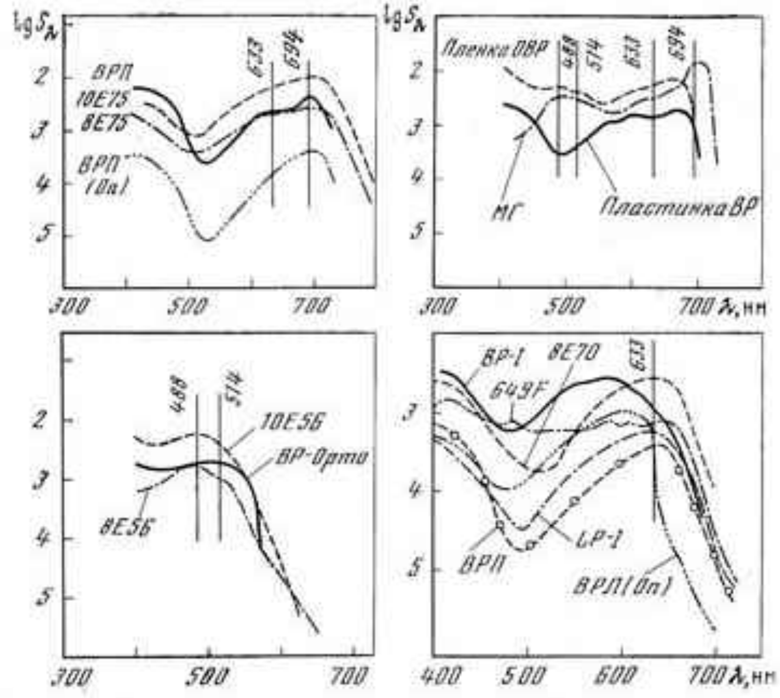


Рис. 2.3. Сравнительные кривые спектральной светочувствительности различных высокоразрешающих фотоматериалов для голографии [71]

указывают, что наиболее выгодно применять материалы с примерно равномерной светочувствительностью для всего видимого спектра, поскольку они могут использоваться при голографировании с разными лазерами. Вместе с тем нельзя не иметь в виду, что более высокие показатели светочувствительности могут быть достигнуты при их спектральной сенсибилизации для более узких зон спектра, соответствующих монохроматическим излучениям лазеров.

Представляются интересными опубликованные сравнительные данные [71] о спектральной светочувствительности многих высокоразрешающих фотоматериалов, приведенные в табл. 2.3. Определения проводились по одной и той же методике (Гост 2818-45) в спектросенситометре ИСП-73 и получены из предварительно построенных кривых спектральной светочувствительности (см. рис. 2.3). Из приведенных данных можно видеть, что наиболее высокой спектральной светочувствительностью при доста-

Таблица 2.3

Сравнительная характеристика спектральной светочувствительности (в 10^{-4} Дж/см^2) различных высокоразрешающих фотоматериалов для голографии [71]

Фотоматериал	λ=488 нм	λ=514 нм	λ=633 нм	λ=694 нм
Агфа-Геверт 10Е56	0,18	0,28	—	—
ВР-Орто	0,56	0,56	—	—
Агфа-Геверт 8Е56	0,56	1,00	—	—
Агфа-Геверт 8Е70	—	—	0,42	—
ВР-I	—	—	6,89	—
Кодак 649F	—	—	1,59	—
ВРЛ-I (опытный)	—	—	1,78	—
ОРВО LP-1	—	—	2,08	—
ВРЛ	—	—	3,54	—
Агфа-Геверт 10Е75	—	—	0,13	0,09
ВРП	—	—	0,36	0,24
Агфа-Геверт 8Е75	—	—	0,48	0,34
ВРЛП (опытный)	—	—	—	2,82
Микрат голографический (МГ)	0,32	0,33	0,32	0,07
Особовысокоразрешающие (ОВР)	0,21	0,25	0,19	0,71
ВР	4,00	2,69	0,79	2,59

точно высоком качестве голографического изображения характеризуются фотопластинки Агфа-Геверт 8 Е (56, 70 и 75) и 10Е (56 и 75). Вместе с тем при сравнимом качестве изображения фотопластинки Кодак 649 F по сравнению с фотопластинками 8 Е (56, 70 и 75) имеют значительно меньшую светочувствительность, что может объясняться широкой зоной их спектральной сенсибилизации по всему спектру (рис. 2.3). Сравнительная оценка других фотоматериалов затруднительна, поскольку недостаточно ясен вопрос о получаемом на них качестве изображения.

Изложенные выше данные об энергетической светочувствительности различных голографических фотоматериалов не могут все же дать представления об их фактической голографической светочувствительности и экспозиционных характеристиках, которые связаны с дифрак-

ционной эффективностью получаемого изображения и экспозицией при голографировании.

В монографии Кольера, Буркхарта и Лина [3] подробно рассматриваются вопросы экспозиционных характеристик и голографической светочувствительности фотоматериалов. В процессе голографирования только часть энергии используемого лазера участвует в формировании голографического изображения. Примерно 30—50% общей энергии лазерного света не доходит до поверхности голограммы и теряется из-за необходимости равномерного освещения объекта голографирования и фотопластинки. При голографировании диффузно отражающих объектов лишь около 10% падающего на них света доходит до голограммы. Около 5% света теряется при прохождении света через каждую линзу и его отражении от зеркал, используемых при голографировании. Отсюда коэффициент полезного действия лазерного света небольшой и практически не бывает больше примерно 5% от общей мощности лазера. Это необходимо учитывать при определении экспозиции при голографировании, но не принимать во внимание при определении фотографической светочувствительности голографических фотоматериалов.

При определении голографической светочувствительности фотоматериалов, кроме требуемой экспозиции, учитываются контраст регистрируемой интерференционной структуры и дифракционная эффективность, получаемая при восстановлении голограмм. Голографическая светочувствительность $S_г$ реальных и идеальных фотоматериалов определяется выражением [3]

$$S_г = \sqrt{\eta}/E_0V, \qquad (2.3)$$

где η — дифракционная эффективность; E_0 — экспозиция; V — видность (контраст) интерференционных полос. Последняя определяется по Майкельсону:

$$V=(I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min}), \qquad (2.4)$$

где I_{max} и I_{min} обозначают соответственно максимальные и минимальные интенсивности интерференционных полос.

Теоретически считается [3, 43], что голографическая светочувствительность идеального фотоматериала не зависит от средней экспозиции, видности интерференционных полос и пространственной частоты объектной волны. Если считать, что при голографировании видность интерферен-

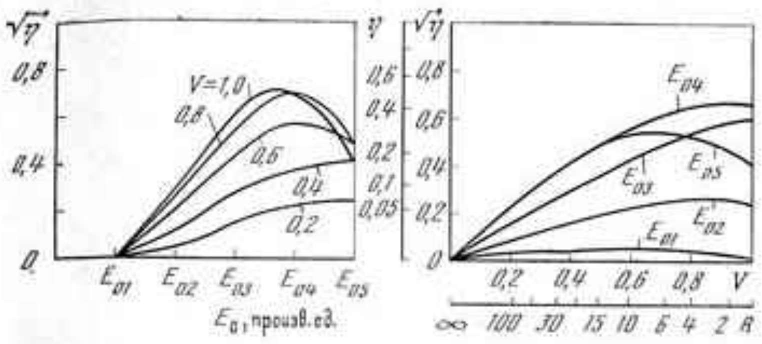


Рис. 2.4. Экспозиционные характеристики для различных голографических материалов [3, 43]

R — отношение интенсивностей опорного и объектного лучей

ционных полос V должна иметь определенное значение, то исходя из выражения (2.3) голографическая светочувствительность $S_г$ пропорциональна корню квадратному из дифракционной эффективности η и обратно пропорциональна экспозиции E_0. Зависимость $\sqrt{\eta}$ от E_0 при различных V и зависимость $\sqrt{\eta}$ от V при разных значениях E_0 для идеальных фотоматериалов графически представляется в виде прямых линий, которые можно рассматривать как их экспозиционные характеристики.

Хотя понятие и определение голографической светочувствительности идеальных и реальных фотоматериалов совпадают (см. (2.3)), однако для реальных фотоматериалов линейность экспозиционных характеристик выполняется в ограниченном интервале. К этому надо добавить и дополнительные искажения в регистрации голограмм, которые сопутствуют реальным фотоматериалам. Вместе с тем получаемые для них не прямые (как для идеальных фотоматериалов), а реальные экспозиционные характеристики позволяют получить необходимую информацию о свойствах конкретных фотоматериалов.

На рис. 2.4 показаны экспозиционные характеристики реальных фотоматериалов в виде зависимостей соответственно $\sqrt{\eta}$ от E_0 при различных значениях видности интерференционных полос V и $\sqrt{\eta}$ от V при различных экспозициях E_0. Такое представление экспозиционных характеристик имеет то преимущество, что оно подходит для различных фотоматериалов при записи на них пропускающих

и отражательных, а также амплитудных или фазовых голограмм и позволяет их сравнивать в разных конкретных условиях голографирования. Приведенные экспозиционные кривые дают возможность получить:

1) необходимые данные об интервалах видности интерференционных полос или соотношении интенсивностей опорного и объектного лучей, в которых запись голограмм является линейной;

2) максимально достижимое значение дифракционной эффективности;

3) величины экспозиций (как меру светочувствительности) для достижения заданной дифракционной эффективности;

4) оптимальные значения средней экспозиции для достижения наилучшего компромисса между линейностью записи голограмм и получаемой дифракционной эффективностью.

Указанные выше достоинства определения экспозиционных характеристик и голографической светочувствительности фотоматериалов, хорошо разработанные теоретически, являются все же сложными для их практического применения. Поэтому они не находят пока широкого применения для сравнительной оценки голографических свойств различных выпускаемых и разрабатываемых высокоразрешающих фотоматериалов.

Для более полной характеристики светочувствительности голографических фотоматериалов и связи ее с качеством получаемых на них голограмм Бидерман [72] вводит понятие голографического индекса экспозиции S_n, определяемого выражением

$$S_n = S_i/X, \tag{2.5}$$

где S_i — фотографическая светочувствительность; X — фактор потерь света, связанный с соотношением интенсивностей опорного и объектного лучей и дифракционной эффективностью. Как нетрудно видеть, голографический индекс экспозиции отражает эффективную светочувствительность голографических фотоматериалов в конкретных условиях голографирования и связан с качеством получаемых голограмм. Вместе с тем определение его, как и голографической светочувствительности, является сложным, и он пока не находит практического применения.

Простым и доступным в практическом отношении является определение так называемой экспозиционной светочувствительности голографических фотоматериалов, представляющей собой экспозицию (в эрг/см² или Дж/см²), необходимую для достижения оптимальной дифракционной эффективности фотоматериала в конкретных условиях голографирования. При этом в отличие от энергетической (монохроматической) светочувствительности экспозиционная светочувствительность (экспозиция) определяется в виде интенсивности светового потока, падающего непосредственно на голограмму, с учетом потерь света при голографировании.

Суханов и Андреева [73] провели сравнительные определения энергетической и экспозиционной светочувствительностей различных высокоразрешающих фотоматериалов при голографировании во встречных пучках. Результаты этого исследования приводятся в табл. 2.4. Проявление голограмм проводилось в модернизированном бессульфитном проявителе с аммиаком [74] с формированием оптимального голографического изображения, как и обычно, в области соляризации характеристической кривой.

Из приведенных в табл. 2.4. сравнительных данных видно, что между полученными значениями экспозиционной и энергетической светочувствительностей различных фотоматериалов не может быть установлена определенная корреляция. Это понятно, поскольку они определяются по отношению к различным потокам света (с учетом и без учета его потерь при голографировании и др.).

Экспозиционная светочувствительность при голографировании в сходящихся пучках определяется по другому критерию — по некоторой оптической плотности на негативной ветви характеристической кривой, соответствующей максимальной дифракционной эффективности. Это является недостатком понятия экспозиционной светочувствительности, поскольку для разных способов голографирования она может быть различной для одного и того же фотоматериала. Однако ее достоинством является то, что она одновременно указывает и дифракционную эффективность получаемых голограмм, т. е. отражает их качество. Определения экспозиционной светочувствительности проводятся при экспонировании с набором ряда серых фильтров (для достижения оптимальной экспозиции) при голографировании в сходящихся

Таблица 2.4

Сравнительная характеристика экспозиционной $H_{опт}$ и энергетической $H_{D_0+0,2}$ светочувствительностей различных высокоразрешающих фотоматериалов [73]

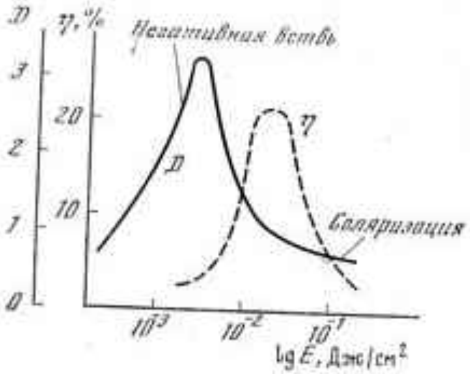
Фотоматериал	η, %	$H_{опт}\cdot 10^2$, Дж/см²	$H_{D_0+0,2}\cdot 10^4$, Дж/см²	Полуширина спектрального распределения, Å
Слои Айвса *	24	3	5	145
Слои Валента *	24	2	5	165
ПЭ-1 (пластинки)	12	0,3	1,6	170
ПЭ-1 (пленка)	10	1,6	2,5	200
СРБШ-1	6	0,7	5	230
Микрат ВРЛ	7	0,6	20	280
ВРЛ (Госниихимфотопроект	7	0,1	0,5	120
ВР-2 (ЛИКИ)	7	3	3	150
Агфа-Геверт 8Е70	8	0,07	0,8	220

* Изготовлены в лабораторных условиях.

пучках при определенном угле между объектным и опорным лучами, а во встречных пучках — при голографировании плоского зеркала, что применяется для определения дифракционной эффективности.

Результаты Стаселько и Смирнова [75] по исследованию особенностей поведения высокоразрешающих фотопластинок Микрат ВР и Кодак 649F при экспонировании импульсным рубиновым лазером обнаружили их существенное различие в отношении явления невзаимозаместимости, что указывает на необходимость учитывать это явление и при использовании других фотоматериалов для голографии. Кольер, Буркхархт и Лин [3] отмечают, что фотоматериалы Агфа-Геверт 8Е75, 10Е75 и 14С75 обладают наиболее высоким уровнем светочувствительности при голографировании с импульсным рубиновым лазером. При длительном экспонировании этих фотоматериалов от 10 до 50 нс нарушение явления невзаимозаместимости приводит к необходимости увеличения для них экспозиции в 2—4 раза. Фотопластинки Кодак 649F характеризуются небольшой чувствительностью к излучению импуль-

Рис. 2.5. Зависимость дифракционной эффективности η голограмм во встречных пучках от экспозиции и связь ее оптимальной величины с областью соляризации характеристической кривой фотоматериала [73]



сного рубинового лазера. Их спектральная светочувствительность падает в 10 раз при изменении длины волны излучения с 633 до 694 нм и еще в 10 раз за счет явления невзаимозаместимости. Последнее может быть уменьшено путем увеличения продолжительности проявления фотопластинок.

Следует указать, что применяемый в литературе термин «ориентационная» чувствительность [65] не имеет отношения к обычному понятию светочувствительности фотоматериалов. Он характеризует голограммы в отношении регистрации на них ряда изображений под разными углами.

Кроме светочувствительности, голографические фотоматериалы могут характеризоваться и другими сенситометрическими показателями. Следует, однако, иметь в виду, что голографические характеристики фотоматериалов удобнее связывать не с их обычной характеристической кривой, а с кривой амплитудного пропускания.

Так как голографическое изображение строится из дифракционных решеток разной пространственной частоты, то, исходя из общих данных о качестве обычного фотографического изображения, можно считать, что наиболее высокое качество голограмм (четкость штрихов решеток) связано с применением контрастных фотоматериалов с коэффициентом контрастности γ больше трех. Это подтверждается результатами исследования Какичашвили, Гафуровой и Борина [76], показавшими, что при увеличении коэффициента контрастности фотоматериала (с одним и тем же типом эмульсии) с 2,8 до 7,8 его эффек-

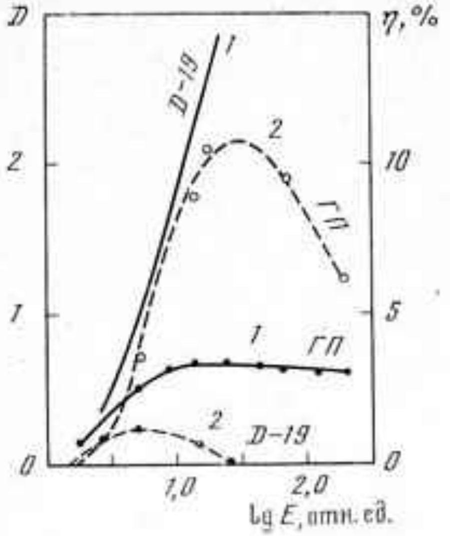


Рис. 2.6. Зависимость оптической плотности D (кривые 1) и дифракционной эффективности η (кривые 2) от экспозиции голограмм в сходящихся пучках на фотопластинках Микрат-ВРЛ, проявленных в проявителе Д-19 (5 мин) (сплошные кривые) и выравнивающем проявителе ГП (40 мин) (пунктир) [77]

тивная светочувствительность повышается в два с лишним раза. Следует также из общих соображений считать оправданным наличие в голографических фотоматериалах высоких максимальных плотностей изображения (>3), малого уровня вуали и большой фотографической широты.

Однако указанные традиционные общесенситометрические показатели не могут правильно оценивать качество голографических фотоматериалов и получаемых на них голограмм, что уже отмечалось выше в отношении светочувствительности и имеет также место для коэффициента контрастности, максимальных плотностей и вуали. Согласно данным, опубликованным Сухановым и Андреевой [73], оптимальное качество голограмм во встречных пучках получается при их проявлении с обращением и формировании голографического изображения в нижней части области соляризации характеристической кривой (рис. 2.5). В этих условиях достигается оптимальная дифракционная эффективность, но контрастность изображения (наклон кривой) и плотность голограмм являются небольшими (проявление голограммы проводилось в модернизированном бессульфитном пирогаллоловом проявителе [74]).

Для проявления голограмм в сходящихся пучках Усанов и Ермолаев [77] разработали разбавленный фенидонгидрохиноновый выравнивающий проявитель ГП

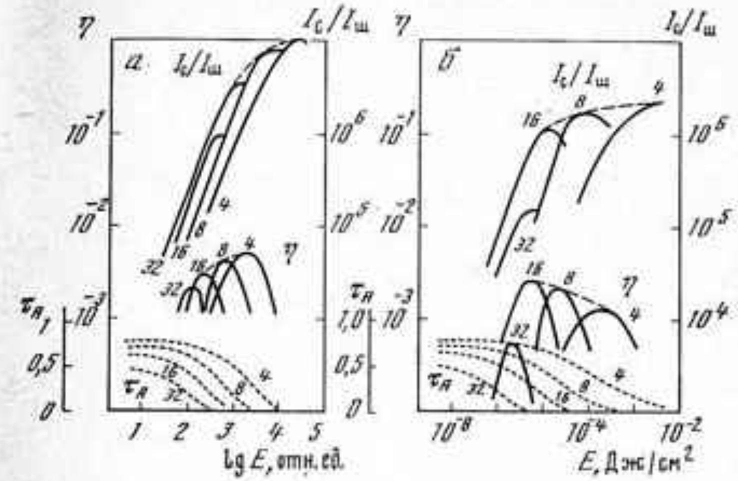


Рис. 2.7. Зависимость дифракционной эффективности η, отношения сигнала к шуму $I_c/I_ш$ и амплитудного пропускания $τ_A$ голограмм в сходящихся пучках на фотопластинках Микрат-ВРЛ от экспозиции при разной продолжительности проявления в проявителе УП-2 (цифры у кривых в мин) [79]

а — экспонирование гелий-неоновым лазером (λ=633 нм); *б* — экспонирование импульсным рубиновым лазером (λ=694 нм, $τ_{имп}=4\cdot10^{-8}$ с)

в котором дифракционная эффективность голограмм на фотопластинках Микрат ВРЛ резко возрастает и составляет 10,6 вместо 1,4% при проявлении в проявителе в Д-19. Но при этом коэффициент контрастности и максимальная плотность являются небольшими, как это можно видеть из сравнительных кривых, приведенных на рис. 2.6. «Прозрачные» фотопластинки ПЭ-2 [78] хотя и имеют повышенную вуаль, однако на них получается наиболее высокое качество голограмм во встречных пучках с дифракционной эффективностью до 40–50%.

Приведенные примеры показывают, что при характеристике различных голографических фотоматериалов надо отходить от их традиционной общесенситометрической и резольвометрической (по разрешающей способности) оценки и переходить на прямую голографическую оценку. Для этого вместо сложных экспозиционных характеристик, как уже отмечалось, можно использовать более простые характеристики экспозиционной светочувствительности и соответствующей ей оптимальной дифракционной эффективности типовых голограмм, получаемых в конкретных

условиях голографирования. Если практически возможно, то такую характеристику целесообразно дополнить уровнем шумов и частотно-контрастной характеристикой, определяемой голографическими методами. Нельзя не отметить, что оптимальные голографические характеристики достигаются при некоторых оптимальных экспозициях и продолжительности проявления, что иллюстрируется соответствующими кривыми на рис. 2.7 [79]. При этом, как можно видеть, оптимальные характеристики для голографирования с гелий-неоновым и с импульсным рубиновым лазерами различаются между собой.

2.4. Содержание серебра, толщина эмульсионного слоя и другие требования

Исходя из того что современные тонкослойные мелкозернистые кинофотоматериалы обладают высоким содержанием серебра по отношению к содержанию желатины [80], можно было предполагать, что подобные же данные могут характеризовать и высокоразрешающие фотоматериалы для голографии. Однако проведенные опыты показали, что такая характеристика не может к ним относиться. Объясняется это тем, что если наиболее высокое качество обычного оптического фотографического изображения достигается тогда, когда оно строится в возможно более тонкой верхней части эмульсионного слоя, то оптимальное голографическое изображение должно формироваться во всей его толще. При этом в зависимости от вида получаемых голограмм (пропускающих или отражающих, двумерных или трехмерных) требования к содержанию серебра и толщине эмульсионного слоя могут изменяться.

Анализ имеющихся данных о синтезе «беззернистых» липпмановских эмульсий, используемых и в настоящее время в разных видоизменениях для изготовления голографических фотоматериалов, указывает на небольшое содержание в них серебра. К таким же выводам в целом приводят и опубликованные [71] результаты определения содержания серебра в воздушно-сухом эмульсионном слое и его толщины для многих голографических фотоматериалов, приведенные в табл. 2.5.

Из табл. 2.5 видно, что для всех исследованных фотоматериалов содержание серебра в сухом слое невелико (0,26—0,59 г/см³), при этом наименьшее для «прозрачных»

Таблица 2.5

Содержание серебра c_{AgHal} в воздушно-сухом эмульсионном слое и его толщина h для различных голографических фотоматериалов [71]

Фотоматериал	h, мкм	c_{AgHal}, г Ag/см³	Фотоматериал	h, мкм	c_{AgHal}, г Ag/см³
Отечественные материалы					
Пластинки			Пленки		
Микрат ВР	18	0,40	Микрат 900	7–8	0,41
Микрат ВРЛ	18	0,39	Особовысокоразрешающие (ОВР)	7–8	—
Микрат ВРЛ (опытн.)	8–9	0,55			
ПЭ-1	12	0,26	Микрат голографический (МГ)	7–8	0,42
СРБШ-3	10	0,59			
Тип Валента (лаборат.)	6–8	0,35			
Зарубежные материалы					
Кодак 649F	15	0,49	Агфа-Геверт		
ОРВО LP-1	10	0,31	8E75	7	0,45
Агфа-Геверт			10E56	7	0,59
			10E70	7	0,53
8E56	7	0,46			
8E70	7	0,45			

фотопластинок ПЭ-1. Объясняться это может не только высокой кроющей способностью особомелкозернистых фотослоев. Как было показано Лином и Ло-Бианко [81], дифракционная эффективность голограмм повышается при уменьшении содержания серебра в используемых фотопластинках Кодак 649F. Этот вывод затем был подтвержден Андреевой и др. [82] при получении голограмм во встречных пучках. При этом одновременно было обнаружено уменьшение дифракционной эффективности при увеличении прокраски эмульсионного слоя сенсибилизирующим красителем [82, 83]. Однако более позднее исследование [60, 61] показывает, что повышение дифракционной эффективности с уменьшением содержания в эмульсии серебра относится лишь к получению отражательных голограмм во встречных пучках; для пропускающих же плоских голограмм имеется обратная зависимость.

Рассмотренные выше данные в целом указывают на небольшое содержание серебра в голографических фотоматериалах. Учитывая их нормальную толщину, можно сделать вывод, что отношение в голографических эмульсиях и фотоматериалах содержания желатины к содержанию серебра является достаточно высоким. Это служит характерным отличием их от современных тонкослойных мелкозернистых кинофотоматериалов [80].

Приведенные в табл. 2.5 данные показывают, что толщина эмульсионного слоя различных высокоразрешающих фотоматериалов для голографии изменяется примерно от 5 до 20 мкм, что может объясняться их различным назначением и свойствами эмульсий, используемых для их полива. Для наиболее употребительных фотоматериалов толщина эмульсионного слоя составляет 7—12 мкм, однако имеющиеся данные показывают, что оптимальная толщина фотоматериала связана с применяемым способом голографирования и видом получаемых голограмм.

По экспериментальным данным Смита [84] максимальная дифракционная эффективность пропускающих голограмм, получаемых в сходящихся пучках, достигается при толщине эмульсионного слоя фотоматериала 7 мкм, причем при ее увеличении дифракционная эффективность сохраняется постоянной (рис. 2.8, *а*). Из расчетов Кимля [85], исходящего из того, что дифракционная эффективность фазовых (отбеленных) отражательных голограмм при обычной толщине фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70 составляет 15%, следует, что при увеличении толщины слоя до 20 мкм дифракционная эффективность повышается до 50%, а при толщине слоя 50 мкм она достигает 76,4%, т. е. близка к предельной (рис. 2.8, *б*). Вместе с тем указывается, что в случае более толстых эмульсионных слоев трудно устранять образующиеся в голограммах дефекты.

В опубликованных микрофотографиях микросрезов эмульсионного слоя липпмановских интерференционных фотографий [8, 9, 86] число зарегистрированных прослоек стоячих волн составляет 30—40 и более, что соответствует толщине слоя около 10 мкм. Указывается [8, 9], что число таких прослоек должно быть большим, поскольку при их увеличении улучшается чистота цвета.

Кириллов [87] недавно провел расчеты зависимости дифракционной эффективности η идеализированных отражательных голограмм от толщины эмульсионного слоя в

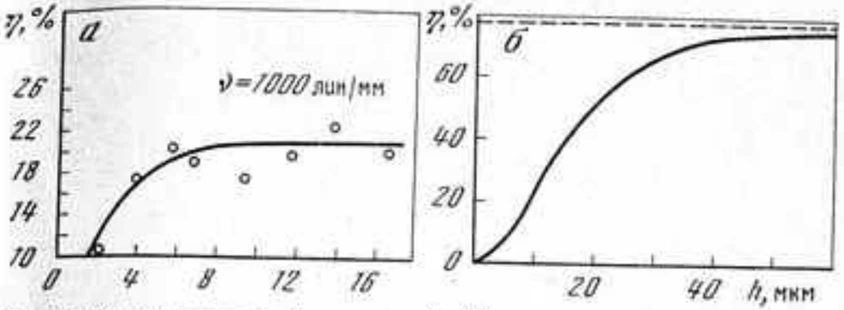


Рис. 2.8. Зависимости дифракционной эффективности η амплитудных голограмм в сходящихся пучках [84] (*а*) и фазовых отражательных голограмм (по расчетам Кимля для фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70 с обычной толщиной эмульсионного слоя [85]) (*б*) от толщины эмульсионного слоя фотоматериала *h*

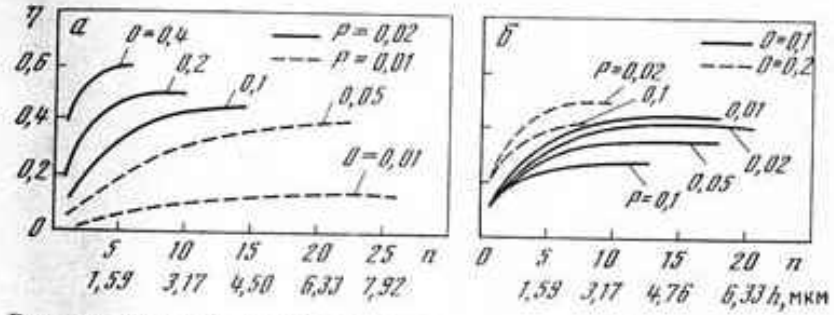


Рис. 2.9. Влияние толщины эмульсионного слоя фотоматериала *h* на дифракционную эффективность η амплитудных отражательных голограмм при разном коэффициенте отражения (*а*) и разной доле поглощения света элементарными слоями (*б*) [87]

зависимости от коэффициента отражения проявленного серебра *O* и доли поглощаемого монохроматического света *P* каждым элементарным слоем голограммы (серебряной прослойкой).

Для данных условий выведено следующее уравнение:

$$\eta = O\{1+[1-(O+P)]^2+[1-(O+P)]^4+\ldots$$
$$\ldots+[1-(O+P)]^{2n-2}\}, \qquad (2.6)$$

где *n* — число элементарных слоев голограммы.

Анализ выведенного уравнения и иллюстрирующих его кривых, приведенных на рис. 2.9, показывает, что с увеличением отражательной способности проявленного сереб-

ра O дифракционная эффективность голограмм повышается с одновременным значительным уменьшением числа элементарных слоев (толщины) голограмм. Наоборот, при увеличении поглощающей способности проявленного серебра P дифракционная эффективность голограмм уменьшается. При этом для небольшого коэффициента отражения с увеличением числа элементарных слоев происходит постепенный рост дифракционной эффективности, тогда как для высоких его значений дифракционная эффективность быстро достигает максимальной величины, которая увеличивается при повышении коэффициента отражения проявленного серебра. Однако необходимо иметь в виду, что при высоких значениях коэффициента отражения селективность восстановления голограмм белым светом может уменьшаться.

Таким образом, оптимальные результаты, а именно достаточная дифракционная эффективность при хорошей селективности восстановления голограмм, могут получаться при некоторых средних коэффициентах отражения проявленного серебра, что необходимо учитывать в практической работе. Отсюда следует, что достижение 100%-ной дифракционной эффективности отражательных амплитудных голограмм практически нереально. Рассмотренные данные могут также объяснять получение различных результатов при экспериментальных исследованиях зависимости дифракционной эффективности голограмм от толщины эмульсионного слоя для различных фотоматериалов и процессов их обработки, поскольку при этом отражательная способность проявленного серебра может быть различной. Получение при проявлении отражательных голограмм в проявителях ГП-2 и ФМГ высокой дифракционной эффективности в 40—50%, а при отбеливании в 60—70% может объясняться образованием в этих условиях более эффективной фазовой модуляции.

Из изложенного следует, что для обеспечения высокого качества голографического изображения важное значение имеет равномерный нанос эмульсионного слоя на подложку, отсутствие в нем каких-либо загрязнений. Подложка (стекло, основа пленки) и поливаемый на нее эмульсионный слой должны быть плоскими и без существенной разнотолщинности. Необходима минимальная усадка эмульсионного слоя после обработки фотоматериала, для чего целесообразно применять его сильное задубливание. Для полива особомелкозернистых голографических эмульсий необходимо прецизионное поливное оборудование.

2.5. Требуемый и существующий ассортимент высокоразрешающих фотоматериалов для голографии

В последнее время в отечественной и зарубежной химико-фотографической промышленности разработаны и изготавливаются небольшими партиями различные высокоразрешающие фотоматериалы для голографии, которые в известной мере удовлетворили потребности в них при голографических исследованиях и с которыми связаны многие успехи в развитии голографии. Надо иметь в виду, что без необходимых высокоразрешающих фотоматериалов нельзя мыслить практическую реализацию голографии. Несмотря на то что в ближайшие годы потребности в данных фотоматериалах, как можно полагать, будут удовлетворяться выпуском их небольшими партиями (до начала массового применения голографии), их дальнейшие разработки и совершенствование должны продолжаться. Отсюда полезно, хотя бы в общем виде, представить примерный ассортимент требуемых голографических фотоматериалов и сопоставить его с уже имеющимися фотоматериалами.

Наиболее полный ассортимент высокоразрешающих фотоматериалов для голографии в настоящее время выпускается фирмой Агфа-Геверт [63]. Он включает в себя три типа материалов с тремя уровнями энергетической светочувствительности с соответствующими различными уровнями разрешающей способности (8Е, 10Е и 14С) и узкими зонами спектральной сенсибилизации для голографирования с различными лазерами. Для удовлетворения проводимых голографических исследований этот ассортимент все же недостаточен и должен быть дополнен фотоматериалами с широкой зоной сенсибилизации по всему спектру видимого света для цветного голографирования и особомелкозернистыми «прозрачными» фотоматериалами для получения высококачественных отражательных голограмм, особенно необходимых в изобразительной технике. К таким фотоматериалам относятся отечественные особомелкозернистые «прозрачные» фотоматериалы ПЭ-1-633, ПЭ-2 (633—694), ЛОИ-2-633 и ЛОИ-2-694 [60, 62]. Фотоматериалы подобного типа пока не изготавливаются

Таблица 2.6

Примерная характеристика необходимого ассортимента высокоразрешающих фотоматериалов для голографии (в видимом диапазоне света)

Показатель (для оптимальной обработки)	Особомелкозернистые (типа ПЭ-2, ЛОИ-2)	Высокоразрешающие I (типа 8Е, 649 F, ВР-М)	Высокоразрешающие II (типа 10Е, ВРЛ)	Высокочувствительные (типа 14С, ФПГ-2
Энергетическая светочувствительность, эрг/см²	1000–5000	200–500	30–100	2–10
Разрешающая способность, лин/мм	⩾10 000	⩾5000	⩾3000	⩾1000

Примечание. Указанные типы фотоматериалов в зависимости от задач могут быть сенсибилизированы для следующих длин волн: 690, 633, 515—480, 400—700 нм (цветная голография). Может быть сенсибилизация и для других отдельных узких зон спектра. В качестве подложки могут быть использованы фотостекло, зеркальное и оптическое стекло, триацетатная и лавсановая основа, зеркальные слои и др.

зарубежными фирмами. Недавно опубликованы данные [66] о разработке фирмой Агфа-Геверт нового высокоразрешающего панхроматического фотоматериала Пан-300 для цветного голографирования. Отечественной химико-фотографической промышленностью изготавливаются также высокоразрешающие фотопластинки типа ВРЛ [57] с разной спектральной сенсибилизацией и высокочувствительная голографическая пленка ФПГ-2 [56].

На основании рассмотренных выше данных можно считать, что в ближайшие годы развитие голографии потребует относительно небольшого ассортимента высокоразрешающих фотоматериалов, примерная характеристика которых для видимого света приводится в табл. 2.6. Понятно, что указываемые характеристики могут в некоторой мере изменяться и уточняться. При этом они во многом отражают выпускаемые и разработанные в настоящее время фотоматериалы, как это можно видеть из сопоставления с характеристиками табл. 2.4 и 2.5. В дополнение в табл. 2.7 приводится характеристика голографических фотоматериалов, указываемых в монографии Островского [2]. В этой таблице показатели для фотоматериалов Агфа-Геверт 14С (70 и 75) и 10Е (56, 70 и 75) указаны по фирмен-

Таблица 2.7

Общая характеристика некоторых выпускаемых высокоразрешающих фотоматериалов для голографии [2]

Фотоматериал	λ (предельн.), нм	R, лин/мм	θ, град.	$H_{D=0,5}$, эрг/см²	λ, нм *
Кодак 649F	700	>5000	180	1000	633
				7000	694
Пленка					
ФПГВ	700	2800	125	10–20	633
Микрат-900	640	2800	125	500–100	633
Кодак SO–243	750	500	19	2	633
Микрат-300	640	300	11	—	
Панхром-18	730	250	9	0,3	633
Пластинки ВРЛ	640	2800	125	100	633
Пленка Агфа-Геверт					
14С75	750	1500	62	3	694
10Е56	560	2800	84	50	480
10Е70	700	2800	125	50	633
10Е75	750	2800	150	50	694
8Е56	560	>5000	180	200	480
8Е70	700	>5000	180	200	633
8Е75	750	>5000	180	200	694
Пленка и пластинка Агфа-Геверт 14С70	700	1500	56	3	633

* Длины волн излучения, при которых определена светочувствительность $H_{D=0,5}$

ным данным [63], а для материалов 8Е (56, 70 и 75) — по результатам получения на них отражательных голограмм во встречных пучках, являющимся более высокими, чем фирменные данные (3000 лин/мм).

Необходимо подчеркнуть, что сравнительная характеристика различных голографических фотоматериалов весьма затруднительна вследствие разных методик их оценки различными фирмами и разными авторами. В этом отношении представляют интерес приводимые в табл. 2.8 результаты сравнительных исследований различных отечественных и зарубежных голографических фотоматериалов, выполненных по одним и тем же методикам. Средний диаметр эмульсионных зерен определялся на электрон-

ном микроскопе ТЭСА-В-242 при увеличении в 20 000 раз. Разрешающая способность фотоматериалов измерялась интерференционным методом с гелий-неоновым лазером. Фотоматериалы проявлялись в метолгидрохиноновом проявителе Д-19.

Из табл. 2.8 можно видеть, что все исследованные фотоматериалы в целом являются высококонтрастными с небольшим уровнем вуали. Резко повышенную (на один порядок) общую светочувствительность имеют лишь материалы Агфа-Геверт 10Е (56 и 70), имеющие больший размер зерен ($d_{ср}$=0,085 мкм), остальные материалы мало отличаются между собой как по общей светочувствительности (0,1—1,5·10^{-2}), так и среднему размеру эмульсионных зерен ($d_{ср}$=0,040÷0,060 мкм). К сожалению, отсутствие в таблице голографических характеристик данных об энергетической светочувствительности и ограничение предельной разрешающей способности разных материалов (не выше 3000 лин/мм) не позволяют оценить их голографические свойства, которые, как следует из некоторых рассмотренных ранее данных, все же значительно различаются между собой.

Представляет интерес привести ряд дополнительных данных о высокоразрешающих фотоматериалах для голографии и их свойствах.

В проспекте фирмы Кодак-Пате [88] указывается, что выпускаемые на лавсановой основе с прозрачным контрслоем голографические пленки *SO*-173 и фотопластинки 120-02 поливаются эмульсиями, являющимися производными от эмульсии 649F, но более мелкозернистыми, сенсибилизированными в 10—25 раз сильнее для длинноволновой области спектра (до λ÷750 нм) и используемыми при голографировании с гелий-неоновым, криптоновым и рубиновым лазерами. Этой же фирмой с той же эмульсией выпускается голографическая пленка *SO*-253 на лавсановой основе с противоореольным (окрашенным желатиновым) слоем для голографирования с гелий-неоновым лазером.

Интересны результаты исследования [89] характеристик пропускающих голограмм, получаемых на фотослоях толщиной около 400 мкм. В этом случае эмульсионный слой фотопластинок Агфа-Геверт 8Е75 размачивался в течение 2 ч в дистиллированной воде и затем после набухания экспонировался с помощью гелий-неонового лазера

Таблица 2.8

Сравнительные результаты исследования различных отечественных и зарубежных голографических фотоматериалов [57]

Фотоматериал	$S_{D_0+0,85}$, 10^{-2} ед. ГОСТ	λ_{max}, нм	γ	D_0	Краевая резкость	d, мкм	R, лин/мм: максимальная	R, лин/мм: при спаде ЧКХ до 0,5	h, мкм
Микрат-ВР (МЗТФ до 1970)	4,3	610; 680	3,6	0,22	—	0,070	2000	900	11
ВР (МЗТФ)	1,2	490; 600	5,5	0,05	1,0	0,050	>3000	2200	10
ВРЛ (МЗТФ)	1,5	630	5,0	0,08	—	0,050	>3000	2300	10
Кодак-HR (США)	1,5	560	5,5	0,04	1,0	0,040	3000	2000	6
Кодак-MR (Англия)	1,5	500; 530	4,5	0,04	1,6	0,060	2000 *	—	8
Сакура (Япония)	1,4	500; 530	5,8	0,04	1,2	0,040	2000 *	—	5,5
Агфа-Геверт 8Е56	1,3	520	5,0	0,06	0,9	0,050	3000 *	—	9
Агфа «Микромаск»	1,1	475; 520	5,0	0,04	1,0	0,054	>3000	1700	8
Агфа-Геверт 10Е56	50	470; 520	6,0	0,05	1,5	0,085	3000	500	8
Агфа-Геверт 10Е70	60	640	5,5	0,10	—	0,085	3000	500	10—11
ОРВО- LO-2	1,2	490; 530	4,3	0,04	1,3	0,060	2000 *		

* По данным фирмы.

Примечание. λ_{max} — максимум спектральной чувствительности, *d* — средний диаметр зерен, *R* — разрешающая способность, *h* — толщина эмульсионного слоя.

и подвергался обработке (проявлению, фиксированию и отбеливанию). Для устранения усадки эмульсионного слоя и достижения стабильных результатов получаемые голограммы обрабатывались в течение 16 ч в глицероле, закрывались стеклом со стороны слоя и герметизировались. При этом для частоты 400 лин/мм дифракционная эффективность составила 45%. Устранение снижения дифракционной эффективности отбеленных голограмм при хранении может быть достигнуто неполным вымыванием отбеливающих компонентов при промывке, но при этом увеличивается рассеяние света во время восстановления голограмм. Имеются сведения [90] о выпуске новой фотопленки с противоореольным слоем для голографирования с гелий-неоновым и криптоновым лазерами.

Недавно разработанные [91, 92] фотопластинки ВРМ характеризуются средним диаметром эмульсионных зерен, равным 25 нм, и разрешающей способностью более 5000 лин/мм, а усовершенствованные фотопластинки ВРЛ — средним диаметром зерен 45 нм и разрешающей способностью более 3000 лин/мм. На этих фотопластинках получены фазовые отражательные голограммы с дифракционной эффективностью, равной соответственно 10 и 3% при отбеливании раствором, содержащим бромную медь.

Опубликованы данные о разработке голографических фотопластинок для инфракрасной области спектра для длин волн 840, 865 и 910 нм [93, 94] и 1060 нм [95] с разрешающей способностью более 1000—2000 лин/мм. Фирмой Ильфорд [96] выпускаются фотопластинки со светочувствительностью 500 эрг/см^2 и разрешающей способностью 3000 лин/мм для голографирования с гелий-неоновым лазером. Имеются сведения [97—99] о сравнительной голографической характеристике различных фотоматериалов, оптимизации их свойств для записи высококачественных голограмм [100, 101] и применении для этого методов планирования эксперимента [102], причем характеристики различных материалов в разных работах расходятся между собой, что может объясняться разными методами и критериями оценки. Отмечается [103, 104] высокое качество регистрации трехмерных голограмм на фотопластинках ЛОИ-2.

Проводятся работы по изучению условий воспроизведения цвета в цветной голографии [3, 105—107], указывающие на большую сложность решения интересующих теоретических вопросов и неясность ряда исходных предпосылок. Опубликованы интересные данные о получении крупноформатных голограмм на фотопленках, которые во избежание коробления при голографировании накатываются на толстое зеркальное стекло [108] или зажимаются между двумя полированными оптическими стеклами толщиной 16 мм [109]. Интересны данные [110] о механизме образования беспигментной окраски крыльев некоторых бабочек и возможности других голограммоподобных объектов в живой природе.

Заслуживают внимания недавно опубликованные данные о получении голограмм с высокой дифракционной эффективностью [111], голографировании больших объектов [112] и некоторые новые голографические материалы [113].

Несмотря на наличие некоторых противоречивых данных разных авторов при оценке голографических характеристик и качества голограмм, получаемых на различных высокоразрешающих фотоматериалах, можно все же сделать вывод о необходимости предъявления существенно более жестких требований к фотоматериалам, используемым в изобразительной технике для получения отражательных голограмм во встречных пучках. При получении пропускающих голограмм могут успешно применяться менее высокодисперсные и менее высокоразрешающие фотоматериалы с более высоким уровнем светочувствительности, при этом для улучшения качества голограмм (уменьшения ореолообразования) целесообразно применять противоореольную защиту. Высокоразрешающие фотоматериалы для получения отражательных голограмм на встречных пучках должны быть особомелкозернистыми «прозрачными», чтобы практически устранить рассеяние света при голографировании. Для получения высококачественных цветных голограмм фотоматериалы должны иметь разрешающую способность, превышающую 10 000 лин/мм. Такими характеристиками пока обладают лишь отечественные особомелкозернистые «прозрачные» фотоматериалы ПЭ и ЛОИ-2. Кривые спектральной светочувствительности пластинок ЛОИ-2 приведены на рис. 2.10.

Нельзя не отметить, что связь визуального восприятия качества голографического изображения с его голографическими характеристиками пока исследована недостаточно. Можно, например, указать, что многие высокоразрешаю-

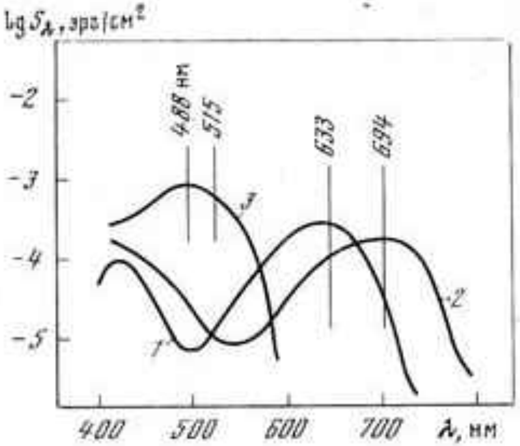


Рис. 2.10. Кривые спектральной светочувствительности особомел-козернистых голографических фотопластинок ЛОИ-2 [62]

1 — сенсибилизация для гелий-неонового лазера; 2 — рубинового лазера; 3 — аргонового лазера

щие фотоматериалы характеризуются относительно мал отличающимися между собой дифракционными эффектив ностями, однако визуально их качество заметно различает ся. Для выяснения причин такого расхождения в различ ной оценке получаемых результатов необходимо проведе ние дальнейших более детальных исследований интересу ющих вопросов. Представляется также целесообразны сопоставить между собой различные методы синтеза особо мелкозернистых высокоразрешающих эмульсий [114—167] с их физико-химическими, фотографическими и голографи ческими характеристиками, что, однако, не входит в задач настоящей работы.

Глава 3

ОБРАБОТКА ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

3.1. Общая характеристика

Особенности формирования голографических изображений в виде дифракционных решеток разной пространственной частоты, располагающихся во всей толще эмульсионного слоя, обусловливают использование в голографии не только особомелкозернистых высокоразрешающих фотоматериалов, но и различных специфических процессов их обработки, существенно отличающихся от обычно применяемой обработки кинофотоматериалов. При этом обработка фотоматериалов изменяется при получении на них обычных амплитудных или фазовых (отбеленных) голограмм, а также при регистрации в светочувствительном слое пропускающих или отражательных голограмм.

Различная необычная и специфическая обработка фотоматериалов при получении разных видов голограмм объясняется тем, что при этом может существенно повышаться их эффективная светочувствительность, дифракционная эффективность и другие характеристики. Может также уменьшаться усадка эмульсионного слоя после обработки, что имеет важное практическое значение, поскольку она вносит искажения в цвет восстанавливаемого голографического изображения.

За последние годы развития голографии были проведены интересные исследования и разработка различных процессов обработки высокоразрешающих голографических фотоматериалов, при этом накопился и достаточный опыт в их практическом применении. Оказалось полезным использовать имеющиеся данные об обработке «беззернистых» фотоматериалов в липпмановском способе цветной интерференционной фотографии [8, 9], который, как уже отмечалось, может считаться прообразом современной голографии.

Таблица 3.1

Разные виды обработки высокоразрешающих фотоматериалов для голографии и готовых голограмм

Вид обработки	Назначение и содержание
Предварительная обработка (перед голографированием)	Выдерживание материала в атмосфере с нормальной влажностью
	Дополнительная сенсибилизация (гиперсенсибилизация и др. для повышения светочувствительности)
Обычная и специфическая обработка экспонированных фотоматериалов	Размачивание и задубливание эмульсионного слоя
	Проявление скрытого голографического изображения
	Фиксирование (стабилизация) и промывка проявленного изображения
	Улучшение голографических характеристик обработанного материала (уменьшение усадки эмульсионного слоя, улучшение равномерности его сушки)
	Получение фазовых (отбеленных) голограмм
	Удаление зеркального слоя, перенос эмульсионного слоя
Обработка готовых голограмм	Улучшение голографических и эксплуатационных характеристик голограмм
	Исправление погрешностей в экспозиции при голографировании и неполадок при обработке путем применения процессов усиления, ослабления и тонирования

Для достижения высокого качества голографического изображения важное значение имеет предварительная обработка голографических фотоматериалов перед экспонированием, заключающаяся в выдерживании фотоматериалов при нормальных гигрометрических режимах и возможном повышении их светочувствительности путем гиперсенсибилизации или прогрева. Большое значение имеет

также обработка готовых голограмм с целью улучшения их качества и придания им дополнительных свойств.

На основании имеющихся данных различные процессы обработки фотоматериалов для голографии можно подразделить на три вида, общая характеристика которых приводится в табл. 3.1.

3.2. Предварительная обработка фотоматериалов

В отличие от обычной фотографии в голографии к состоянию эмульсионного слоя (его толщине, а следовательно, и содержанию влаги) во время голографирования и после обработки должны предъявляться жесткие требования. В качестве примера достаточно указать, что в случае голографирования во встречных пучках при обычной толщине эмульсионного слоя, равной 10 мкм, уменьшение ее после обработки на 10% (т. е. до 9 мкм) смещает цвет зарегистрированного оранжевого изображения в зеленый и, наоборот, при увеличении на 10% (т. е. 11 мкм) — в красный цвет. Из этих данных следует, что путем изменения толщины эмульсионного слоя до голографирования и после обработки голограмм можно соответственно изменять цвет получаемого голографически изображения, что используется практически (путем обработки необработанного и обработанного фотоматериала в растворах различных пластифицирующих и гигроскопических веществ). Нетрудно видеть, что если до голографирования и после обработки фотоматериала происходит значительное изменение его толщины, то при восстановлении голограмм изображение может вообще исчезнуть.

Из изложенного выше следует необходимость выдерживания фотоматериалов перед голографированием и во время голографирования в атмосфере с нормальной температурой и влажностью, что, однако, пока на практике учитывается недостаточно. Необходимо также устранять усадку эмульсионного слоя после обработки и рассматривать голограммы при нормальной влажности атмосферы или покрывать эмульсионный слой голограмм прозрачным лаком.

В связи с небольшой светочувствительностью высокоразрешающих фотоматериалов для голографии, обусловливаемой их высокой дисперсионной характеристикой, в практике голографии, особенно при голографировании

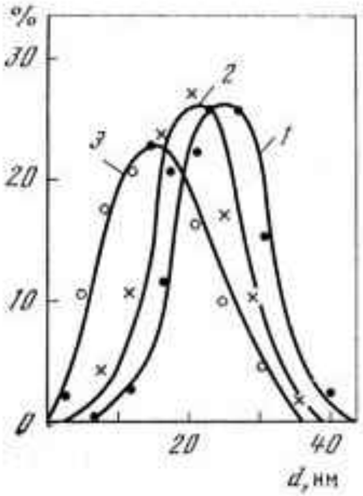
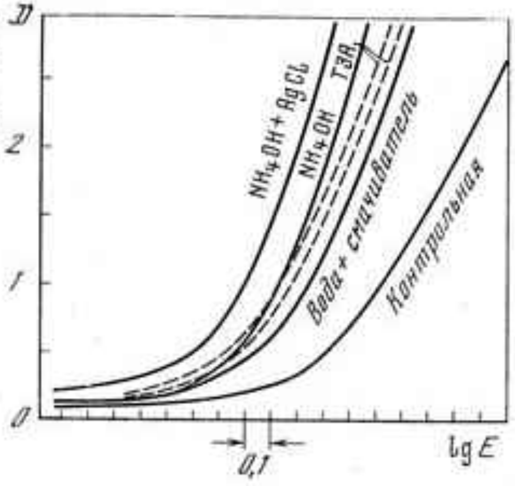


Рис. 3.1. Кривые распределения эмульсионных зерен (по диаметру d) исходной особомелкозернистой эмульсии (*1*) и после ее обработки в 2%-ном ТЭА в течение 1 мин (*2*) и в течение 10 мин (*3*) [169]

во встречных пучках, применяется их гиперсенсибилизация перед голографированием, обычно в растворах триэтаноламина (ТЭА). Первоначальные опасения относительно того, что при обработке в ТЭА может ухудшаться качество получаемых голограмм, оказались необоснованными. Ванин и Назарова [168] показали, что при обработке в ТЭА стало возможным записывать голограммы во встречных пучках на фотопластинках Микрат-ВР. Объясняться это может растворяющим действием ТЭА на эмульсионные зерна, что следует из результатов исследования Самойлович и Рябовой [169], показавших, что после 10-минутной обработки особомелкозернистой эмульсии в 2%-ном растворе ТЭА средний диаметр зерен в ней уменьшается с 25 до 15 нм (рис. 3.1).

По данным разных авторов [34, 49, 52, 72], гиперсенсибилизация высокоразрешающих фотоматериалов проводится в растворах ТЭА разной концентрации — примерно от 0,1—0,2 до 2%. Степень гиперсенсибилизации зависит как от концентрации ТЭА, так и от используемых фотоматериалов (степени их химической сенсибилизации) и изменяется от нескольких десятков процентов до примерно одного порядка. Светочувствительность фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70 и 10Е70 после гиперсенсибилизации в ТЭА возрастает в 1,5—2 раза [72], «прозрачных» фотопластинок ПЭ-1-633 — на порядок [52]. После гиперсенсибилизации в ТЭА фотопластинки высушива-

Рис. 3.2. Сравнительные характеристические кривые высокоразрешающих фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70 при их гиперсенсибилизации в разных растворах [72]



ются и затем перед голографированием выдерживаются при нормальных гигрометрических условиях. После обработки полученные голограммы обычно обрабатываются в 1—2%-ном растворе ТЭА для устранения усадки эмульсионного слоя.

Гиперсенсибилизация высокоразрешающих фотоматериалов может проводиться не только в растворе ТЭА, но и в растворах других веществ. По старым данным [8, 9], светочувствительность «беззернистых» липпмановских фотопластинок значительно повышалась после их обработки в слабом 0,5%-ном растворе сульфита натрия и в слабом кислом водном или спиртовом растворе азотнокислого серебра (азотнокислое серебро — 0,5 г, уксусная кислота — 0,5 мл, вода или этиловый спирт — 100 мл).

Для гиперсенсибилизации фотопластинок Агфа-Геверт 8Е70 и 10Е70 Бидерман [72] исследовал применение раствора ТЭА (0,7—1%), аммиака, аммиака с хлористым серебром и смачивателя. Наибольшее повышение экспозиционного индекса (в 3—4 раза) было получено для фотопластинок 8Е70 при их гиперсенсибилизации в растворе аммиака с хлористым серебром (рис. 3.2), а для пластинок 10Е70 — в растворе аммиака. В этой же работе приводятся некоторые данные о применении латенсификации фотопластинок для повышения светочувствительности.

Значительное повышение экспозиционного индекса фотопластинок 10Е70 наблюдается при их экспонировании во время нахождения в проявляющем растворе, что применяется при ускоренной обработке в голографической интерферометрии.

Борин, Гафурова и Киселева [170] исследовали повышение светочувствительности голографической пленки ФПГ-В при гиперсенсибилизации и латенсификации путем ее обработки в воде соответственно до и после экспонирования. Полученные результаты не показали существенного эффекта, что может объясняться достаточной химической сенсибилизацией исходной эмульсии при поливе пленки. Вместе с тем данный способ (обработка в воде) может дать достаточный эффект при применении его для других фотоматериалов.

Рябова и Самойлович [171] указывают, что при гиперсенсибилизации особомелкозернистых фотоматериалов с $R \geqslant 2500$ лин/мм в растворах ионов серебра, тиосульфата и солей золота их светочувствительность повышалась в 100—150 раз.

Недостатком процесса гиперсенсибилизации является плохая сохраняемость гиперсенсибилизированных фотоматериалов, которая для разных фотоматериалов обычно изменяется от нескольких дней (и даже от нескольких часов) до нескольких недель. Интересные данные о процессе гиперсенсибилизации приводятся в публикациях, посвященных его применению с целью повышения светочувствительности фотоматериалов в ядерной физике и астрономии.

В последнее время для повышения светочувствительности голографических фотоматериалов начинают применять их прогрев, что использовалось и ранее разными авторами [172—174] со значительным эффектом (до порядка) по отношению к обычным фотоматериалам.

Ярославская, Андреева и Сухапов [175, 176] в результате исследования прогрева (при 40—100° С) высокоразрешающих фотопластинок ЭВР-ЛИКИ и ЛОИ-2-633 показали, что оптимальное повышение их светочувствительности (примерно на порядок) достигается при температуре прогрева 70° С в течение 30—40 ч, причем достигаемый уровень светочувствительности является практически таким же, что и при гиперсенсибилизации в ТЭА (рис. 3.3), с одинаковой дифракционной эффективностью голограмм,

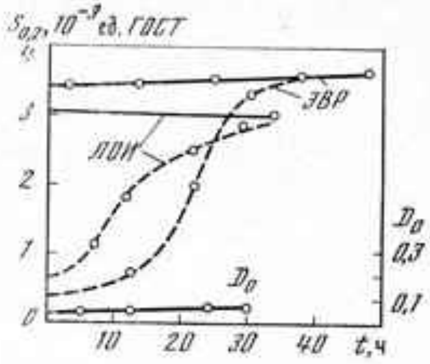


Рис. 3. 3. Сравнительные кривые повышения светочувствительности высокоразрешающих фотопластинок ЛОИ-2-63 и ЭВР-ЛИКИ при их прогреве при 70° С (пунктир) и гиперсенсибилизации в ТЭА (сплошные кривые) [176]

получаемых во встречных пучках. Особенностью прогрева является то, что при прогреве спектр дифракционной эффективности сдвинут не в коротковолновую, а в длинноволновую область. Объясняется это тем, что при прогреве толщина эмульсионного слоя уменьшается вследствие уменьшения его влажности, а при последующей обработке восстанавливается до своей исходной величины. Данное явление устраняется при предварительном выдерживании прогретых фотопластинок в атмосфере с нормальной влажностью. Важно, что в отличие от гиперсенсибилизации (рис. 3. 4, *а*) сохраняемость фотопластинок после прогрева остается обычной (год, а видимо, и более; рис. 3.4, *б*). В исследовании Усанова и Кособоковой [177] приводятся интересные данные, показывающие, что при увеличении продолжительности прогрева фотопластинок ЛОИ-2 происходит возрастание уровня вуали, но при этом максимум дифракционной эффективности отражательных голограмм смещается в сторону меньших экспозиций.

Рассмотренное повышение светочувствительности высокоразрешающих фотопластинок при их прогреве может объясняться протеканием термического созревания эмульсионных слоев, которое, как можно полагать, является эффективным, как и при гиперсенсибилизации, для тех фотоматериалов, при поливе которых исходные эмульсии подвергались недостаточной химической сенсибилизации. Нельзя, однако, не отметить сложность применения процессов гиперсенсибилизации и прогрева и надо полагать, что в ходе дальнейшего развития голографии будут разработаны фотоматериалы достаточной светочувствительности без применения этих процессов.

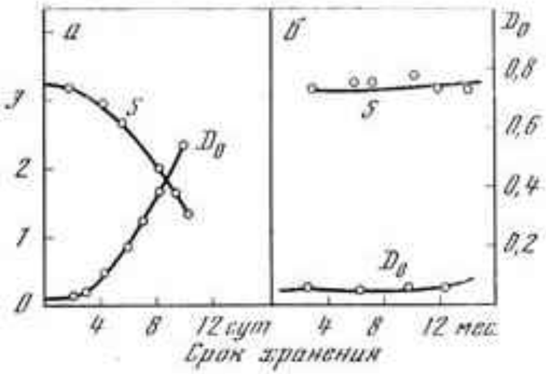


Рис. 3.4. Сравнительные характеристики сохраняемости светочувствительности $S_{0,2}$ и изменение уровня вуали D_0 от срока хранения при гиперсенсибилизации (а) и прогреве (б) [177]

Ларионов, Лукин и Мустафин [178] в результате исследования сенситометрических характеристик различных голографических фотоматериалов получили данные, указывающие, что при предварительной обработке (перед экспонированием) некоторых фотопластинок их светочувствительность значительно возрастает. В этой же работе приводятся интересные данные о регрессии скрытого изображения, отклонениях от закона взаимозаместимости и влиянии условий экспонирования различных фотоматериалов на их характеристики.

3.3. Обработка фотоматериалов при голографировании в сходящихся пучках

Формирование тонкой интерференционной структуры голографического изображения во всей толще светочувствительных слоев указывает на необходимость применения при обработке голограмм дополнительных операций, кроме их обычного проявления и фиксирования. Это подтверждает и накопленный опыт практического применения голографии. К таким общим при обработке голограмм, получаемых в сходящихся и встречных пучках, операциям относятся предварительное размачивание фотоматериала для обеспечения его более равномерного проявления (что применяется в обычной фотографии), которое может совмещаться с его задубливанием, последующая (после проявления и фиксирования) обработка голограмм

для устранения их усадки, получение отбеленных (фазовых) голограмм с повышенной дифракционной эффективностью, обеспечение равномерной сушки готовых голограмм и другие. Вместе с тем основной стадией обработки высокоразрешающих фотоматериалов для голографии остается процесс проявления, так как он определяет структуру и качество получаемого изображения.

Поскольку не все высокоразрешающие фотоматериалы для голографии являются сильнозадубленными, целесообразно подвергнуть их предварительному задубливанию. Это увеличивает прочность эмульсионного слоя при обработке, уменьшает его усадку и позволяет проводить обработку при повышенных температурах. Наиболее сильное дубление эмульсионного слоя достигается в щелочных растворах формалина. Могут также применяться дубящие растворы с алюмокалиевыми квасцами и другие, используемые в обычной фотографии [179].

Для предварительного задубливания фотопластинок ВР-Л рекомендуется их 5-минутная обработка в следующем растворе [180]:

Формалин (40%-ный)	5 мл
Сульфат натрия (моногидрат)	50 г
Углекислый натрий безводный	12 г
Бромистый калий	0,4 г
Вода дистиллированная	до 1 л

После дубления фотоматериал промывается и высушивается.

Дубящий раствор с формалином и нитробензимидазолом (Кодак SH-5) рекомендуется для предварительного дубления зарубежных высокоразрешающих фотоматериалов для голографии:

Формалин (40%-ный)	5 мл
Нитробензимидазол (0,2%-ный раствор)	100 мл
Сернокислый натрий безводный	50 г
Сода безводная	10 г
Вода	до 1 л

Вместо формалина можно применять его полимерное порошкообразное соединение параформальдегид.

Для задубливания различных высокоразрешающих фотоматериалов может рекомендоваться следующий

кислый дубящий раствор с алюмокалиевыми квасцами [179]:

Алюмокалиевые квасцы (крист.)	50 г
Уксуснокислый натрий (крист.)	40 г
Уксусная кислота (80%-ная)	5 мл
Вода	до 1 л

Надо иметь в виду, что после задубливания сенситометрические показатели фотоматериала могут изменяться, обычно в сторону некоторого понижения их светочувствительности.

При обычной обработке фотоматериалов для голографии, как и в фотографии, вначале они подвергаются проявлению, затем, после промежуточной промывки (споласкивания), — фиксированию (или стабилизации) проявленных изображений и промывке. Могут также применяться различные процессы обращения изображения и разные другие способы проявления, что пока не находит распространения в практике голографии.

С точки зрения равномерности проявления и создания условий выравнивающего проявления выгодно применять двухрастворное проявление с обработкой материала вначале в растворе проявляющих веществ с сульфитом, а затем в растворе щелочи или готового проявителя. Представляется также целесообразным (в особенности для отражательных голограмм) после обработки фотоматериала в проявляющем растворе прикатывать к эмульсионному слою инертную пленку и оставлять в таком виде фотоматериал до завершения его проявления. Не менее целесообразно для достижения равномерности проявления во всей толще эмульсионного слоя применять его пропитывание проявляющим раствором на холоду, а затем — проявление при повышении температуры до нормальной, как это используется для проявления толстослойных ядерных фотоматериалов. Недавно были опубликованы данные [181] о получении положительных результатов при обработке голограмм в процессе их одновременного проявления и фиксирования. Можно полагать, что при использовании вместо фиксирования голограмм их стабилизации в кислых растворах тиомочевины, роданидов и других будет достигаться небольшая усадка эмульсионного слоя после обработки. Это связывается с тем, что процесс стабилизации обычно сопровождается повышенной набухаемостью эмульсионного слоя, в связи с чем может не применяться промывка. Представляется, что имеющийся огромный опыт в применении различных процессов обработки обычных кинофотоматериалов в ближайшее время в той или иной мере будет использован и в голографии.

При голографировании в сходящихся пучках и в контрольных испытаниях фотоматериалов для голографии обычно применяются контрастно работающие проявители УП-2, Д-19 и ОРВО-71. В последнее время опубликованы также данные об успешном применении для проявления пропускающих голограмм проявителей выравнивающего типа: Метинол-У, Д-76, ДК-20, ГП, G-3р, Перцентол и др. Рецептура данных проявителей приводится в табл. 3.2 (рецептура проявителей Агфа-Геверт G-3р и Ильфорд-Перцентол пока не опубликована).

Отечественные высокоразрешающие фотоматериалы (ВР, ВРЛ, ПЭ-1, ПЭ-2, ЛОИ-2, ФГМ и др.) при контрольных испытаниях обычно проявляются в проявителях УП-2 или Д-19 [53, 56, 57, 78], материалы Кодак (тип 649F, HR и др.) — в проявителе Д-19 [2, 3, 57], Агфа-Геверт (10E70, 8E70 и др.) — в проявителях Д-19 и выравнивающих проявителях Метинол-У и G-3р [2, 63], материалы ОРВО (LP-1, LO-2 и др.) — в проявителе ОРВО-71 [55] и др. Проявители УП-2 и Д-19 сходны по результатам проявления, но в некоторых случаях проявление в проявителе Д-19 характеризуется несколько меньшим уровнем вуали. Выравнивающий проявитель Перцентол рекомендуется для проявления новых голографических фотоматериалов Ильфорд [183]. Продолжительность проявления при нормальной температуре (20° С) обычно изменяется примерно от 3—5 до 10—12 мин. После короткой промывки в проточной воде следует фиксирование в обычном или кислом быстроработающем или дубящем фиксаже в течение нескольких минут и затем — окончательная промывка. Противоореольный слой, имеющийся в некоторых фотоматериалах (ОРВО, Ильфорд и др.), применяемых при голографировании в сходящихся пучках, обесцвечивается в процессе их обработки. В некоторых случаях после фиксирования и промывки рекомендуется дополнительная обработка фотоматериала в слабых растворах железосинеродистого

Таблица 3.2

Рецептура проявителей, применяемая в контрольных испытаниях высокоразрешающих фотоматериалов и при проявлении пропускающих голограмм (в сходящихся пучках)

Компонент, г	УП-2	Д-19	ОРВО-71	Метинол-У	Д-76	ДК-20	ГП [77]	МАА-3 [182]
Метол	5	2,2	5	1,5	2	5,0	—	2,5
Метилфенидон (или фенидон)	—	—	—	—	—	—	0,005	—
Гидрохинон	6	8,8	6	6	5	—	0,125	—
Сульфит натрия безводный	40	100	40	25	100	100	2,5	—
Арабааскорбиновая кислота	—	—	—	—	—	—	—	10,0
Сода безводная	31	47	—	7,75	—	2,0	—	55,6
Поташ	—	—	40	—	—	—	—	—
Едкое кали	—	—	—	—	—	—	0,125	—
Бура кристаллическая	—	—	—	—	2	—	—	—
Бромистый калий	4	5	3	4	—	0,5	—	1,0
5-нитробензимидазол	—	—	—	—	—	—	0,03	—
Вода, л (до)	1	1	1	1	—	1	1	1

калия с тиосульфатом натрия или двухромовокислого калия с серной кислотой [55, 57], что улучшает резкость края.

Как и в обычной фотографии, увеличение продолжительности проявления голограмм позволяет значительно повысить светочувствительность фотоматериала. Бидерманн [72] показал, что при увеличении времени проявления от 5 до 12 мин голографический индекс экспозиции фотопластинок Агфа-Геверт 10E70 и 8E70 повышается соответственно в 1,7 и 2,6 раза. Из результатов исследования Стаселько и Образцова [79] следует, что при увеличении продолжительности проявления при экспонировании фотопластинок Микрат-ВР как гелий-неоновым, так и импульсным рубиновым лазерами их светочувствитель-

ность значительно увеличивается. При этом дифракционная эффективность достигает некоторого оптимального значения, после чего уменьшается, а отношение полезного сигнала к шуму существенно уменьшается при значительном повышении уровня шума (см. рис. 2. 7).

Кириллов, Масленкова и др. [184] наблюдали при длительном (до 1 ч и более) проявлении «прозрачных» фотоматериалов ПЭ-1-633 в проявителе УП-2 значительный рост светочувствительности при относительно малом вуалеобразовании и необычно «скученном» характере семейства характеристических кривых (рис. 3.5). Причем при увеличении продолжительности проявления значительно повышается дифракционная эффективность (с 2—4% при 8—10 мин до 7—8% при 30—40 мин проявления), но с малым повышением фотометрического эквивалента (при 5—10 мин — 0,0004 г/дм², при 40—60 мин — 0,0006—0,0007 г/дм²). Наблюдаемое малое вуалеобразование при продолжительном проявлении может объясняться протеканием в основном не химического, а физического процесса проявления вуали, на что указывает коричневато-рыжеватый цвет и дихроический характер вуали. В соответствии с этим был разработан более энергично работающий проявитель с уменьшенным содержанием сульфита, позволяющий быстрее проявлять прозрачные фотоматериалы ПЭ-1 со значительно повышенной светочувствительностью:

Фенидон	1 г	Гидроксиламин	1 г
Метол	5 г	Едкий натр	10 г
Гидрохинон	10 г	Бромистый калий	4 г
Сульфит натрия (безводный)	5 г	1-фенил-5-меркаптотетразол	0,04 г
Аскорбиновая кислота	10 г	Вода	до 1 л

Сложность решения вопросов в рассматриваемой области заключается в том, что оптимальные голографические характеристики фотоматериалов достигаются при некоторых оптимальных экспозициях и продолжительности проявления (см. рис. 2.5—2.7), определение которых требует трудоемких испытаний. При этом при одной дифракционной эффективности голограмм без учета уровня шумов и других характеристик не представляется возможным оценивать их качество в целом.

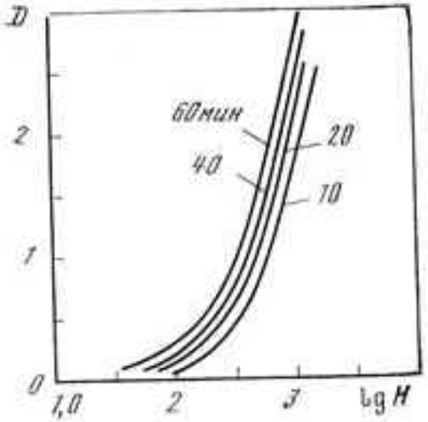


Рис. 3.5. Семейство характеристических кривых «прозрачной» фотопленки ПЭ-1-633 (толщина эмульсионного слоя ~ 5 мкм), проявленной в проявителе УП-2 при 20° С [185]

Получение высокого качества голограмм во многом связано с их правильным экспонированием и проявлением. По имеющимся данным оптимальное качество и дифракционная эффективность обычных голограмм (в сходящихся пучках) достигаются при амплитудном пропускании, равном примерно 0,5, что соответствует оптической плотности 0,6. Следует, однако, иметь в виду, что при проявлении голограмм, получаемых во встречных пучках, и для перевода обычных голограмм в фазовые (отбеленные) их оптимальная плотность должна быть существенно большей.

Поскольку голографическое изображение представляет собой дифракционные решетки разной пространственной частоты, то это может указывать на положительное влияние на их качество (повышение резкости штрихов решеток) местных эффектов проявления, в частности эффектов бордюра и линий Маки. В известной мере этим можно объяснить то внимание, которое в последнее время стало уделяться проявлению пропускающих голограмм в выравнивающих, особенно в сильноразбавленных, малозабуференных проявителях, когда имеется значительное повышение дифракционной эффективности. Выравнивающие проявители Метинол-У и G-3р рекомендуются фирмой Агфа-Геверт, а Перцентол — фирмой Ильфорд для проявления изготавливаемых ими голографических фотоматериалов. Применение выравнивающих проявителей Д-76, ДК-20 и других описано разными авторами, в том числе для получения фазовых (отбеленных) голограмм.

Усанов и Ермолаев [77] опубликовали интересные данные о значительном повышении дифракционной эффективности пропускающих голограмм при их проявлении в разработанном разбавленном малозабуференном фенидонгидрохиноновом проявителе ГП, подобном по своему действию разбавленным бессульфитным пирогалловым проявителям, применяемым для проявления отражательных голограмм. При проявлении пропускающих голограмм на фотопластинках ВРЛ в проявителе ГП их дифракционная эффективность возрастает с 1,4 (при проявлении в проявителе Д-19) до 10,6%, что объясняется образованием более эффективных осадков проявленного серебра; при этом коэффициент контрастности и максимальные плотности невелики (см. рис. 2.6). Несколько позднее Усановым [186] был разработан еще более эффективный сильноразбавленный фенидонгидрохиноновый проявитель ГП-2 с растворителем галогенидов серебра (роданистым аммонием), в котором дифракционная эффективность пропускающих голограмм на фотопластинках ЛОИ-1 составляет 18%, а ЛОИ-2—40% [60, 61] вместо 2—3% при их проявлении в проявителе Д-19. Подобные же результаты, но с повышенной в 2 раза светочувствительностью достигаются при проявлении фотопластинок ПЭ-2 в разработанном Масленковой, Петренко, Кирилловым и др. [185] разбавленном фенидонметолгидрохиноновом проявителе ФМГ.

Влияние добавления растворителей галогенидов серебра (роданистого калия, тиосульфата натрия) в проявители МААЗ, Д-19 и ДК-20 (см. табл. 3.2) на дифракционную эффективность и другие характеристики пропускающих голограмм исследовалось Смитом и Калари [182] при проявлении фотопластинок Кодак 649F и лабораторных фотослоев со средним диаметром зерен 50, 70, 90 и 110 нм. Авторы исходят из того, что дифракционная эффективность η амплитудных пропускающих голограмм может определяться выражением

$$\eta = 0{,}188 a^2 M^2(\bar{\nu})/R, \qquad (3.1)$$

где a — наклон линейной части кривой амплитудного пропускания; $M(\bar{\nu})$ — уровень ЧКХ фотоматериала для средней пространственной частоты $\bar{\nu}$, принимавшейся равной 1000 лин/мм; R — отношение интенсивностей света опорного и объектного пучков (изменялось от 2 до 85).

η, %

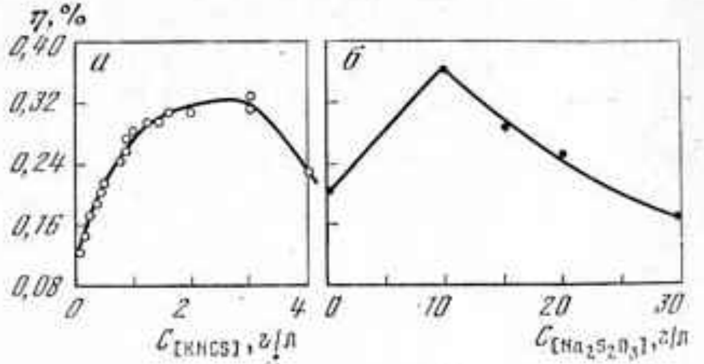


Рис. 3.6. Зависимость дифракционной эффективности η пропускающих голограмм на фотопластинках Кодак 649F от концентраций роданистого калия в проявителе МАА-3 (*а*) и тиосульфата натрия в проявителе Д-19 (*б*) [182]

Исследование показало, что при добавлении в проявитель растворителей галогенидов серебра дифракционная эффективность достигает некоторого оптимального значения и затем уменьшается, как это показано на рис. 3. 6. Подобным же образом достигаются некоторые оптимальные значения дифракционной эффективности и отношение полезного сигнала к шуму в зависимости от амплитудного пропускания, причем их величины резко повышаются при увеличении отношения интенсивностей света опорного и объектного пучков *R*. Полученные результаты зависят от экспозиции и объясняются наличием эффектов, связанных с протеканием физического проявления, которое начинается после того, как в растворе образуется достаточное количество ионов серебра (в результате присутствия растворителей галогенов серебра).

Скиллман [187] приводит результаты исследования влияния условий проявления экспериментальных голографических эмульсий со средним диаметром зерен 20 нм и пленки Кодак 649-Н со средним диаметром зерен 55 нм в проявителях Кодак Д-8, Д-19, Д-76 и МАА-6. Экспозиция в большинстве опытов была такой, что большая часть галогенидов серебра восстанавливалась и захватывала верхнюю часть характеристической кривой и область соляризации. Структура проявленных зерен в разных проявителях различалась между собой, при этом нитеобразная структура наблюдалась и в условиях физического характера проявления. Для большинства исследованных

образцов масса средней частицы проявленного серебра в несколько раз превышала массу средней частицы исходного галогенида серебра. Однако в работе наличие какой-либо связи получаемых результатов с голографическими характеристиками не рассматривается.

В исследовании Усанова [186] было замечено, что при проявлении фотопластинок ЛОИ-1 и ЛОИ-2 высокая дифракционная эффективность наблюдается тогда, когда проявленное серебро окрашено в бурый цвет (при рассматривании в проходящем свете), что связывается с протеканием физического проявления. Кроме бессульфитных пирогаллоловых проявителей с аммиаком и проявителя Д-19, исследовались проявители ГП и ГП-2; лучшие результаты были получены для проявителя ГП-2. Исследование показало, что при увеличении экспозиции размер проявленных зерен значительно уменьшается; наибольший размер проявленных зерен наблюдается в проявленных зернах вуали.

После проявления, промежуточный промывки (в некоторых случаях применяется кислая или кислая дубящая стоп-ванна), затем фиксирования в свежих кислых быстроработающих или дубящих фиксажах (при фиксировании в истощенных фиксажах может образовываться дихроическая вуаль) и окончательной промывки и сушки заканчивается обычная (нормальная) обработка высокоразрешающих фотоматериалов и получаемых голограмм.

Последующая обработка проявленных и отфиксированных голограмм, получаемых в сходящихся пучках, в основном сводится к улучшению равномерности сушки эмульсионного слоя. Для этого применяется обработка голограмм в ваннах с этиловым спиртом разной концентрации или в изопропиловом спирте и в растворах смачивателей.

В табл. 3.3 приводится последовательность и продолжительность отдельных операций, рекомендуемые для обработки выпускаемых фирмой Кодак высокоразрешающих фотоматериалов, которые, как указывается в монографии Кольера, Буркхарта и Лина [3], дают удовлетворительные результаты и при обработке фотоматериалов для научных целей фирмы Агфа-Геверт. Вместо указанного в таблице проявителя Д-19 могут применяться и другие.

Если после обработки происходит изменение толщины эмульсионного слоя на длину одной волны, то это может

Таблица 3.3

Последовательность и продолжительность отдельных операций обработки голографических фотоматериалов Кодак и Агфа-Геверт при обычной температуре 20°С [3]

Операция	Раствор и условия обработки	t, мин
Проявление	Проявитель Кодак Д-19 (при непрерывном перемешивании)	5
Промывка	В проточной воде	0,5
Фиксирование	Быстроработающий дубящий фиксаж Кодак (при непрерывном перемешивании)	5
Промывка	В проточной воде	0,5
Удаление остатков фиксажа	Осветляющий раствор Кодак	1,5
Промывка	В проточной воде	5
Удаление остатков сенсибилизатора	В метаноле	5
Промывка	В проточной воде	1
Сушка	В нормальных условиях	—

приводить к изменению фазы волнового фронта на 180°. Когда такое изменение фазы не имеет существенного значения, то голограммы можно высушивать обычным образом после обработки их (для равномерности сушки) в слабых растворах смачивателей (СВ-104, 1017, Кодак, Фото-фло и др; концентрация примерно 1 г/л) или спирте. При использовании же голограмм в интерферометрии, когда фазовые искажения должны быть сведены к минимуму, после обработки в метаноле (см. табл. 3.3) голограмма сначала пропитывается в течение 1,5 мин денатурированным спиртом, а затем, также в течение 1,5 мин, изопропиловым спиртом, после чего избыток спирта сдувается потоком сухого воздуха, чтобы избежать конденсации воды на поверхности эмульсионного слоя. Таким путем достигается равномерная сушка и равномерная толщина высушенного слоя. При необходимости устранения усадки эмульсионного слоя после обработки применяется дополнительная обработка голограмм (после фиксирования и промывки) в 1—2%-ном растворе ТЭА, глицерина или других пластифицирующих веществ.

3.4. Обработка фотоматериалов при голографировании во встречных пучках

Изложенные выше данные о проявлении голограмм, получаемых в сходящихся пучках, нельзя переносить на проявление голограмм, получаемых во встречных пучках. Последние, исходя из опыта липпмановского способа цветной интерференционной фотографии [8, 9], обычно проявляются в разбавленных бессульфитных пирогалловых проявителях, а в последнее время и в других подобных им выравнивающих проявителях, когда получается область соляризации на характеристической кривой, в которой строится голографическое изображение (см. рис. 2.5). Объясняется это протеканием в данных условиях физического проявления, когда образуются более тонкие (коллоидные) частицы проявленного серебра, окрашенные в светло-коричневый цвет с более высокими отражательными свойствами. В негативной же ветви характеристической кривой проявленные частицы серебра имеют обычные размеры и серо-черный цвет, что можно видеть на получаемых сенситограммах. Исходя из этого, Валента [8] считает, что не все проявители пригодны для проявления липпмановских цветных интерференционных фотографий. Это подтверждается и имеющимся опытом получения современных голограмм во встречных пучках.

Как указывает Валента [8], Липпман проявлял цветные интерференционные фотографии как в кислых, так и в щелочных проявителях. Первый состоит из 1%-ного раствора пирогаллола, и в нем полезно начинать проявление, окончание же проявления следует проводить во втором слабом растворе пирогаллола с небольшим содержанием аммиака и бромистого калия. При таких условиях проявления получаются очень белые осадки серебра и достигается хорошая передача цвета изображения.

В табл. 3.4 приводится рецептура ряда бессульфитных пирогалловых проявителей, описанная разными авторами. Из приведенных в таблице данных можно видеть, что все готовые для употребления рабочие проявляющие растворы отличаются небольшой концентрацией компонентов и в современном понимании могут характеризоваться как разбавленные малозабуференные проявители выравнивающего типа. Особенно небольшой концентрацией компонентов характеризуется проявитель, раз-

Таблица 3.4

Рецептура бессульфитных проявителей с аммиаком

Компонент	Видоизмененный Люмьера [8, 9]	Валента [8, 9]	Леман [8, 9]	Крон [8, 9]	Андреева, Суханов [74]
Запасной раствор					
А. Вода	100 мл	400 мл	100 мл	—	100 мл
Этиловый спирт	—	—	—	100 мл	—
Метабисульфит калия	—	—	0,2 г	—	—
Пирогаллол	1 г	4 г	1 г	10 г	1 г
Азотная кислота	—	6 капель	3 капли	—	—
Б. Вода	200 мл	400 мл	150 мл	300 мл	240 мл
Бромистый калий	20 г	10 г	15 г	—	20 г
Сернистокислый аммоний	—	12 г	—	—	—
Углекислый аммоний	—	—	—	50 г	—
Аммиак (водный раствор, уд. вес 0,91)	67 мл	14 мл	30 мл	—	30 мл
В. Вода	—	—	—	100 мл	—
Бромистый калий	—	—	—	10 г	—
Для употребления					
Раствор А	10 мл	20–30 мл	3 мл	7,5 мл	2,5 мл
Раствор Б	20 мл	10 мл	6 мл	20 мл	5 мл
Раствор В	—	—	—	8–15 капель	—
Вода	70 мл	120–140 мл	100 мл	30 мл	92,5 мл

работанный Андреевой и Сухановым [74] применительно к проявлению современных голограмм, получаемых во встречных пучках. Применение в двух проявителях (Валенты и Крона) соответственно сернистокислого и углекислого аммония (вместо аммиака) может объясняться практическими соображениями, учитывая, что эти соли в растворе гидролизуются с образованием аммиака. По-

скольку бессульфитные пирогалловые проявители обладают сильным избирательным задубливанием эмульсионного слоя при проявлении [179], то можно считать, что это способно вызывать не только амплитудную, но и фазовую модуляцию при восстановлении голограмм и отражается положительно на повышении их качества. В связи с малой сохраняемостью бессульфитных пирогалловых проявителей они приготавливаются непосредственно перед употреблением из запасных растворов.

Продолжительность проявления в пирогалловых проявителях с аммиаком по разным данным изменяется от 3—5 до 10—12 мин (и более) при 15—20° С (в зависимости от их разбавления и температуры). После проявления следует кратковременная промывка, затем — фиксирование, окончательная промывка и сушка. Андреева и Суханов [74] указывают, что продолжительность проявления высокоразрешающих фотопластинок в модернизированном ими пирогалловом проявителе с аммиаком составляют 9—12 мин при 17° С. После проявления пластинки без фиксирования (чтобы уменьшить усадку эмульсионного слоя, которая связывается с удалением из слоя галогенидов серебра при фиксировании) [188] промываются в проточной воде и высушиваются. Дифракционная эффективность проявляемых голограмм во встречных пучках изменяется при изменении длины волны источника света, достигая при этом некоторых оптимальных величин. Одновременно она изменяется при изменении экспозиции и является максимальной при экспозиции, соответствующей ниспадающей области соляризации характеристической кривой. Дифракционная эффективность голограмм изменяется и при изменении режимов их обработки.

Изложенные выше данные свидетельствуют, что для достижения высокого качества современных голограмм полезно в той или иной мере корректировать процесс их проявления. В этом отношении небезынтересно указать, что при получении отражательных голограмм, имеющих достаточную дифракционную эффективность (более примерно 20%), степень их проявления может визуально контролироваться в процессе проявления при их рассматривании на просвет над красным фонарем. Появление в данном случае голографического изображения может объясняться тем, что за счет значительного увели-

чения толщины эмульсионного слоя в набухшем состоянии зарегистрированные в нем отражательные дифракционные решетки изменяют направление своих плоскостей и начинают работать как пропускающие голограммы, рассматриваемые на просвет.

По старым данным [8, 9], которые применимы и к современным голограммам, концентрация аммиака в пирогаллоловом проявителе может несколько изменяться, поскольку она влияет на чистоту цвета в проявленном цветном интерференционном изображении. Для употребления готовый проявитель может также разбавляться водой с добавлением к нему бромистого калия (или без этого) с соответствующим увеличением продолжительности проявления (по пробам). Для фиксирования бромосеребряных и хлоросеребряных липпмановских фотопластинок лучшие результаты получаются при применении 4—5%-ного раствора цианистого калия, когда одновременно удаляется и легкая вуаль за счет растворяющего действия цианистого калия на тонкие частицы серебра. При этом яркость («бриллиантность») получаемых цветов изображения является лучшей, чем при фиксировании в растворе тиосульфата натрия. Однако вследствие сильной ядовитости применение фиксирующих растворов с цианистым калием практически не может рекомендоваться. Липпмановские цветные фотографии получались также без фиксирования проявленных фотопластинок, что используется и в практике современной голографии, но в этом случае сохраняемость получаемых голограмм понижена.

Из изучения особенностей свойств бессульфитных пирогаллоловых проявителей следует, что подобными, а возможно, и лучшими свойствами, в частности лучшей сохраняемостью, могут обладать и другие разбавленные проявители выравнивающего типа. На это указывает и описанное в литературе успешное применение для проявления липпмановских цветных интерференционных фотографий гидрохинонового [189], а также амидолового [8, 9] проявителей с последующим отбеливанием и чернением проявленного изображения. Для проявления голограмм во встречных пучках разработаны современные разбавленные выравнивающие проявители ГП-2 [186] и ФМГ [185]. Применяется также проявление отражательных голограмм в обычных проявителях (Д-19, УП-2,

Таблица 3.5

Рецептура гидрохинонового и амидолового проявителей, применявшихся для липпмановских цветных фотографий, и современных разбавленных выравнивающих проявителей для проявления голограмм

Компонент, г	Гидрохиноновый проявитель [189]	Амидоловый запасной раствор * [8—9]	ГП-2 [186]	ФМГ [185]
Метилфенидон (или фенидон)	—	—	0,0075	0,006
Метол	—	—	—	0,25
Гидрохинон	30	—	0,188	1,25
Амидол	—	20	—	—
Сульфит натрия безводный	75	100	3,75	1,25
Поташ	20	—	—	—
Бура кристаллическая	—	—	—	1,25
Едкое кали	—	—	0,188	—
Бромистый калий	10	—	—	—
1-фенил-5-меркаптотетразол	—	—	—	0,025
Роданистый аммоний	—	—	0,45	—
Вода, л (до)	1	1	1	1

* Перед употреблением к 1—5 мл запасного раствора добавляется 100 мл воды; проявленное изображение отбеливается и затем чернится.

Д-76), но с последующим отбеливанием проявленного серебра (см. раздел 3.5). Рецептура указанных проявителей приводится в табл. 3.5.

Так как растворы амидола (как и пирогаллола) быстро окисляются и становятся буро-коричневыми, то амидоловый проявитель приготавливается непосредственно перед употреблением (добавляют амидол к раствору сульфита, затем разбавляют полученный запасной раствор водой).

Цветные липпмановские интерференционные фотографии проявлялись в гидрохиноновом проявителе при нормальной температуре и затем после кратковременной промывки в воде фиксировались в обычном фиксаже и про-

мывались. Продолжительность проявления в рабочем растворе амидолового проявителя (после разбавления водой) составляет около 2—5 мин. Проявленные фотопластинки споласкиваются в воде, фиксируются в 25%-ном растворе тиосульфата натрия (1—1/2 мин) и после 4—5-минутной промывки отбеливаются, промываются и чернятся в том же амидоловом проявителе и, наконец, промываются 4—5 мин в проточной воде и высушиваются. Хотя по сравнению с пирогаллоловым применение амидолового проявителя более сложно, но в нем экспозиция при съемке уменьшается. Вместо отбеливания в хлорной ртути (из-за сильной ядовитости не может рекомендоваться для применения) могут использоваться отбеливатели с бромной или хлорной медью и другие (см. разд. 3. 5).

Усанов[186], развивая исследования, проведенные при разработке проявителя ГП [77], и детально изучив особенности проявления голограмм на высокоразрешающих фотоматериалах, сделал вывод, что высокая дифракционная эффективность наблюдается в тех случаях, когда частицы проявленного серебра имеют правильную форму и по своим размерам меньше непроявленных исходных зерен. Для этого необходимо соблюдение определенного соотношения между растворимостью эмульсионных зерен и скоростью их восстановления для получения высокодисперсных частиц проявленного серебра, вызывающих не только амплитудную, но и фазовую модуляцию получаемых голограмм. Однако на основании полученных экспериментальных данных автор считает, что это не связано с дубящими свойствами проявителя, что отмечалось выше. Электронно-микроскопические и спектрофотометрические исследования показали, что с увеличением продолжительности проявления и уменьшением экспозиции средний размер проявленных зерен увличивается, при этом в неэкспонированных участках слоя размеры частиц настолько велики, что их можно видеть в обычном микроскопе.

В результате разработан сильноразбавленный малозабуференный фенидонгидрохиноновый проявитель с роданистым аммонием (для растворения галогенов серебра) ГП-2 (см. табл. 3.5). Появление в нем голограммы проводится без перемешивания раствора в течение 12 мин при нормальной температуре. Проявитель начинает находить широкое применение для проявления отражательных голограмм, дифракционная эффективность которых

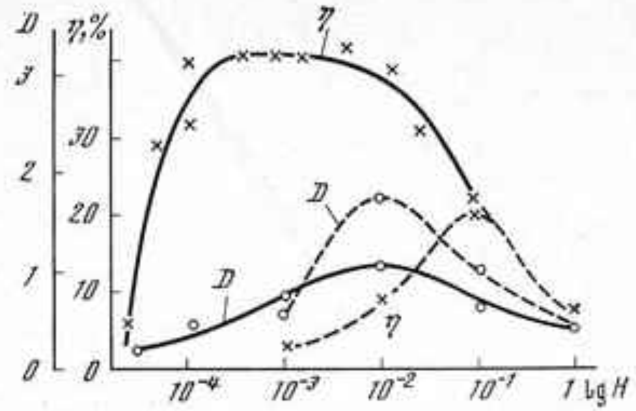


Рис. 3.7. Зависимость оптической плотности D и дифракционной эффективности η отражательных голограмм от экспозиции H при проявлении в проявителе ГП-2 фотопластинок ЛОИ2-63 (сплошные кривые) и фотослоев Валентэ (пунктирные кривые) с предварительной обработкой в ТЭА [104]

на фотопластинках ЛОИ-2 повышается до 50% вместо 35% при проявлении в бессульфитном пирогаллоловом проявителе [60—62]. Исследование Земцовой и Ляховской [103, 104] показывает, что при проявлении фотопластинок ЛОИ-2 в проявителе ГП-2 оптимальная дифракционная эффективность (40%) получается в широком интервале экспозиции (10^{-2}—10^{-4} Дж/см^2 с обработкой в ТЭА) (рис. 3.7), что имеет большое практическое значение.

Масленкова, Петренко, Кириллов и др. [185] при исследовании процесса проявления прозрачных фотопластинок ПЭ-2 (633—694) [78] нашли, что при сильном разбавлении (в 10 — 20 раз) многих обычных и выравнивающих проявителей (Д-19, УП-2, Д-76) может достигаться значительное повышение дифракционной эффективности голограмм. Объясняться это может не только образованием более тонких частиц проявленного серебра, но и повышением его отражательной способности при формировании изображения в области обращения характеристической кривой. При этом наличие на фотопластинках ПЭ-2 повышенной вуали не отражается на достижении высоких показателей дифракционной эффективности и экспозиционной светочувствительности. Хорошая равномерность проявления и высокие характеристики получаются при применении двухрастворного проявления: вначале в слабых

растворах проявляющих веществ, а затем в готовых разбавленных проявителях.

Замечено, что яркость получаемых голограмм зависит от усадки эмульсионного слоя после обработки и при устранении усадки может повышаться. В результате исследования для проявления отражательных голограмм на «прозрачных» фотопластинках ПЭ-2 был разработан разбавленный выравнивающий фенидонметолгидрохиноновый проявитель ФМГ (см. табл. 3. 5.), позволяющий получать высокую дифракционную эффективность (40—50%) при большей светочувствительности и лучшей стабильности по сравнению с проявителем ГП-2. Проявитель ФМГ позволяет также получать хорошие характеристики при проявлении пропускающих голограмм (обычных и микро). Проявление фотопластинок ПЭ-2 проводится при обычном перемешивании проявляющего раствора в течение 10—12 мин при нормальной температуре 20° С. Позднее проявитель ФМГ был несколько скорректирован для повышения дифракционной эффективности, в основном путем его разбавления.

Недавно Петровым [190] разработан быстрый фенидонгидрохиноновый проявитель с растворителем галогенидов серебра (фенидон — 0,5 г, гидрохинон — 8 г, сульфит натрия безводный — 200 г, едкое кали — 12 г, роданистый аммоний — 20 г, вода до 1 л), продолжительность проявления в котором отражательных голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и ВРЛ сокращается до 8—10 с (при 20° С) при дифракционной эффективности до 30%. Как указывается автором, при увеличении продолжительности проявления до 0,5—3 мин эффективная светочувствительность повышается на порядок и более. Это представляет большой практический интерес и согласуется с приведенными ранее данными.

Интересные данные недавно опубликованы Усановым и Кособоковой [191] об обработке голограмм во встречных пучках на фотопластинках ПЛ-2-633, предназначенных для голографирования в сходящихся пучках. Для этого экспонированные во встречных пучках фотопластинки проявлялись в фенидонгидрохиноновом проявителе ГП-8, приготавливаемом добавлением к 60 мл запасного раствора (метилфенидон — 0,2 г, гидрохинон — 5 г, сульфит натрия безводный — 100 г, едкое кали — 10,6 г, роданистый аммоний — 24 г, воды — до 1 л) 400 мл воды. Для нахождения оптимальных условий проявления пластинки проявлялись от 6 до 48 мин при 20±0,5° С, причем в условиях 6-минутного проявления достигалась дифракционная эффективность порядка 45%. Таким образом была показана возможность применения фотопластинок не только при голографировании в сходящихся пучках, но и во встречных пучках. Интересные сведения об обработке голограмм с высокой дифракционной эффективностью приводятся в статьях Филлипса и Порстера [111] и Бентона [112], характеристика некоторых новых голографических фотоматериалов дана в работе Палимова [113].

Для обработки голограмм, получаемых во встречных пучках, особенно большое значение приобретает как равномерность их проявления, так и устранение усадки эмульсионного слоя с обеспечением его равномерной сушки. Усадка эмульсионного слоя после обработки (с фиксированием) может достигать 10—20% [3], что приводит к сильному сдвигу цвета изображений в сторону более коротких длин волн и недопустимо при цветном голографировании. Усадку можно уменьшить, если эмульсионный слой предварительно задубливать перед голографированием.

Устранение усадки эмульсионного слоя после обработки достигается купанием проявленных, отфиксированных и промытых голограмм (можно и после их сушки) примерно в 1—2%-ных растворах пластифицирующих и гигроскопических веществ, таких, как ТЭА, глицерин, сорбит, полиэтиленгликоль и другие, с добавлением в них смачивателей (~1 г/л). Требуемая концентрация этих веществ и режимы обработки голограмм устанавливаются по предварительным пробам.

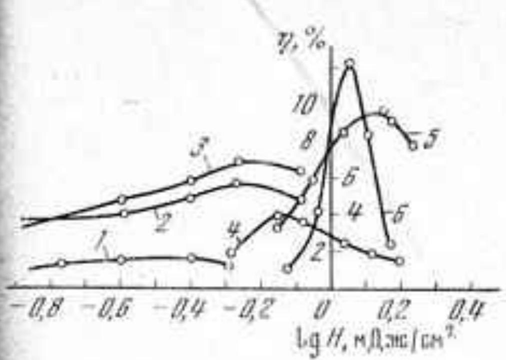
Для более равномерного проявления голограммы предварительно размачиваются в воде или в дубящих растворах.

Для обеспечения равномерной толщины эмульсионного слоя голограммы перед сушкой обрабатываются также в водных растворах этилового спирта с постепенно возрастающей концентрацией, изопропиловом спирте и растворах смачивателей. Подобная дополнительная или специфическая обработка используется в практике применения толстослойных ядерных фотоматериалов, когда достижение равномерности их проявления и сушки, так же как и в голографии, имеет важное значение.

Зависимость дифракционной эффективности отражательных голограмм от условий их обработки и экспозиции весьма сложна и недостаточно изучена. Кроме уже приведенных данных, в этой области интересно недавно опубликованное исследование Петрова, Вахтановой, Богомолова и др. [192] о зависимости дифракционной эффективности отражательных голограмм на фотопластинках ВРМ от различных условий их обработки. Из полученных в этом исследовании результатов (рис. 3.8) можно видеть, что дифракционная эффективность максимальна при некоторой оптимальной экспозиции (существенно различной для разных способов обработки) и более высокая в случае получения отбеленных (фазовых) голограмм. Вместе с тем из-за отсутствия сравнительных данных об уровне шума в фазовых голограммах, который для них обычно повышен, не представляется возможным судить в целом о качестве голограмм при различных условиях их обработки.

Дзюбенко, Пятикоп и Шевченко [193] выполнили интересное исследование о влиянии усадки эмульсионного слоя на дифракционную эффективность отражательных голограмм на фотопластинках Агфа-Геверт 8Е75, ВРЛ и ПЭ-1-633. Голограммы плоского зеркала обрабатывались в трех режимах: 1) обычным образом с проявлением в бессульфитном пирогаллоловом проявителе с аммиаком [73], 2) с проявлением в проявителе Д-19, фиксированием и отбеливанием в растворе железосинеродистого калия с бромистым калием, 3) с проявлением в проявителе Д-19 с обратным отбеливанием (растворением восстановленного при проявлении серебра). Полученные результаты показали, что после устранения усадки эмульсионного слоя максимальная дифракционная эффективность возрастает почти в 2 раза, как это можно видеть из соответствующих кривых, приводимых на рис. 3.9. Максимальная дифракционная эффективность получена для отбеленных голограмм.

Недавно опубликованы данные о целесообразности применения процесса обработки с обращением изображения применительно к высокоразрешающим фотопластинкам ВР-Э для электроники [194], когда практически выгодно сразу получать позитивное изображение. Можно считать, что обработка с обращением изображения будет представлять практический интерес и выгодна при полу-



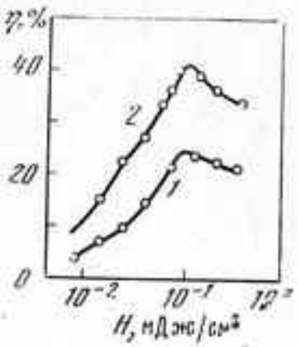


Рис. 3.8. Зависимость дифракционной эффективности η голограмм на фотопластинках ВРМ от различных способов их обработки и экспозиции [192]

1 — амплитудная голограмма, проявитель Д-19; *2—4* — амплитудно-фазовые голограммы, проявители: ДК-20, разбавленный 1:20 (*2*), ГП-2 (*3*) и аммиачный (*4*); *5*, *6* — фазовые голограммы, проявители: Д-19 $CuCl_2$ (*5*) и Д-76, $CuCl_2$ (*6*)

Рис. 3.9. Зависимость дифракционной эффективности η отражательных голограмм от экспозиции до устранения (*1*) и после устранения усадки эмульсионного слоя (*2*) [193]

чении отражательных голограмм, но для этого, видимо, при втором проявлении надо применять специфические голографические проявители, чтобы получать наиболее тонкие хорошо отражающие осадки серебра. Андреева, Суханов, Вейденбах и др. [195] приводят интересные данные о зависимости дифракционной эффективности отражательных голограмм от структуры проявленного серебра. Соболев, Чурсин и др. [100, 102] рассматривают результаты исследования по оптимизации процессов записи и обработки голограмм на фотопластинках ПЭ и ЛОИ-2, в том числе с применением метода планирования эксперимента.

Из рассмотренных выше данных об обработке отражательных голограмм можно видеть, что, кроме обычных стадий проявления, фиксирования и промывки экспонированных фотопластинок, она включает дополнительные операции для возможного повышения светочувствительности фотопластинок, их задубливания, уменьшения или устранения усадки эмульсионного слоя и улучшения равномерности его сушки. Разные фотоматериалы при этом

Таблица 3.6

Последовательность и продолжительность отдельных операций обработки «прозрачных» фотопластинок ПЭ-1-633 при получении голограмм во встречных пучках [168]

Операция	Раствор и условия обработки	t, мин (при 20° С)
Гиперсенсибилизация	2%-ный раствор ТЭА	4
Сушка и выдерживание в нормальных условиях перед голографированием	В нормальных условиях (без вентилятора)	—
Экспонирование (голографирование)	—	—
Размачивание	В воде	3
Проявление	Бессульфитный пирогалловый проявитель с аммиаком	5 (при 17–18° С)
Стоп-ванна	Слабый раствор уксусной или борной кислоты	40 с
Фиксирование	Свежий кислый фиксаж	2
Промывка	В проточной деионизованной воде	10
Устранение усадки слоя и улучшение равномерности его сушки	Последовательная обработка вначале в 2%-ном растворе ТЭА, затем в 50-, 75- и 90%-ном этиловом спирте	4
Сушка	В нормальных условиях	—

могут обрабатываться с применением различных обрабатывающих растворов и режимов обработки. В табл. 3.6 приводится последовательность и продолжительность отдельных стадий обработки «прозрачных» фотопластинок ПЭ-1-633, рекомендуемая Ваниным и Назаровой [168] для получения отражательных голограмм при голографировании во встречных пучках. Понятно, что при обработке других фотоматериалов указанные в таблице операции и режимы обработки могут изменяться. Например, для прозрачных фотопластинок ПЭ-2 (633 — 694) гиперсенсибилизация не требуется, поскольку светочувствительность их при этом практически не повышается, и вместо бессульфитного пирогаллолового проявителя более эффективными являются проявители ГП-2 или ФМГ. Надо также

иметь в виду применение лакировки эмульсионного слоя голограмм для устранения вредного влияния (изменение усадки) окружающей атмосферы.

3.5. Получение фазовых (отбеленных) голограмм

Еще в липпмановском способе цветной интерференционной фотографии применялось проявление в амидоловом проявителе с последующим отбеливанием и чернением проявленного серебра (см. разд. 3.4). Применяются также железный проявитель и отбеливающий раствор с бромной медью.

В современной голографии подобный же процесс отбеливания проявленных и отфиксированных голограмм, но без последующего чернения применяется для получения так называемых фазовых (отбеленных) голограмм, характеризующихся высокой дифракционной эффективностью и повышенным шумом. В фазовых голограммах модулирует не амплитуда, как в обычных голограммах, а фаза зарегистрированного фронта стоячих волн, что достигается изменением коэффициента преломления эмульсионного слоя или созданием в нем соответствующего рельефа. Практически же получаются отбеленные голограммы, в которых модулирует как толщина эмульсионного слоя, так и показатель его преломления, а также сохраняется некоторая модуляция за счет изменения поглощения света.

Фазовые голограммы с модуляцией только толщины эмульсионного слоя получаются путем отбеливания проявленных голограмм в отбеливающе-дубящих растворах, отличающихся избирательным задубливанием эмульсионного слоя. Подобные отбеливающе-дубящие растворы применяются для получения рельефных матриц в цветном гидротипном процессе. Однако такой процесс получения фазовых голограмм со значительно большей (чем обычно) толщиной эмульсионного слоя сложен, причем модулируемые в нем пространственные частоты являются небольшими — до 1200 лин/мм. В связи с этим для получения фазовых голограмм с высоким разрешением находят применение процессы отбеливания, в которых проявленное серебро обычной амплитудной голограммы, но с более высокой (в несколько раз) оптической плотностью превращается в прозрачные соединения, у которых коэффи-

циент преломления больше, чем у эмульсионного (желатинового) слоя. Поскольку такие голограммы больше рассеивают свет, чем обычные (неотбеленные), то они обладают более высоким уровнем шумов.

Разновидностью фазовых (отбеленных) голограмм являются отражательные голограммы, получаемые напылением тонкого слоя металла на поверхность обычных или фазовых голограмм, обладающих достаточным рельефом. При этом такие отражательные голограммы характеризуются высокой дифракционной эффективностью, но пока они не находят распространения, что может связываться с трудностью и сложностью их получения.

Разные способы получения отбеленных голограмм и их характеристик рассматриваются в обзорах [2, 3, 36, 196] и во многих оригинальных работах [180, 193, 197—207]. В отбеленных голограммах коэффициент преломления увеличивается с увеличением количества отбеленного серебра; теоретически он изменяется синусоидально. Для получения оптимальных пропускающих голограмм их исходная плотность (до отбеливания) должна быть во много раз больше, чем у обычной (0,5), что достигается увеличением экспозиции (в 5—10 раз) при голографировании и продолжительности проявления.

Дифракционная эффективность отбеленных пропускающих голограмм на разных фотоматериалах достигает 60—70% и более (вплоть до 100%) вместо нескольких процентов для обычных амплитудных голограмм, проявленных в обычных проявителях Д-19 или УП-2, и 20—40% при проявлении в сильноразбавленных выравнивающих проявителях ГП-2 и ФМГ. Но при этом повышается шум вследствие увеличения рассеяния света в отбеленных голограммах. Более ранние данные о применении отбеливания отражательных голограмм указывают на их малую дифракционную эффективность (~10%) [3, 168] и, таким образом, на нецелесообразность их получения. Однако в недавно опубликованных исследованиях дифракционная эффективность отбеленных отражательных голограмм получена высокой (~45% [193] и 73% [207]), что представляет значительный практический интерес.

Отбеливающие растворы, применяемые для получения фазовых голограмм, по существу содержат те же исходные компоненты (окислители), что и при отбеливании изображений на обычных кинофотоматериалах в процессах усиле-

ния, ослабления и тонирования [179]. Вместе с тем наиболее высокие голографические характеристики получаются при применении специально разрабатываемой рецептуры отбеливающих растворов.

В процессе отбеливания серебряное изображение окисляется и переходит в соответствующие плохо растворимые соли серебра [179], имеющие разные окраску, прозрачность и стабильность к действию света. При отбеливании в растворах хлорной или бромной меди образуются соответственно малостабильное к действию света хлористое серебро (белого цвета) и более стабильное бромистое серебро (желтоватого цвета):

$$CuCl_2 + Ag = AgCl + CuCl, \quad (3.2)$$

$$CuBr_2 + Ag = AgBr + CuBr. \quad (3.3)$$

Отбеливание в растворах железосинеродистого калия приводит к образованию железистосинеродистого серебра (белого цвета):

$$4K_3Fe(CN)_6 + 4Ag = Ag_4Fe(CN)_6 + 3K_4F(CN)_6. \quad (3.4)$$

При действии на серебряное изображение галогенов оно окисляется с образованием хлористого, бромистого или йодистого серебра:

$$Cl_2 + 2Ag = 2AgCl, \quad (3.5)$$

$$Br_2 + 2Ag = 2AgBr, \quad (3.6)$$

$$J_2 + 2Ag = 2AgJ. \quad (3.7)$$

Окисление серебра газообразными или парообразными окислителями в последнее время стало успешно использоваться практически. При таких условиях отбеливания отсутствует излишнее набухание и уменьшение механической прочности эмульсионного слоя при его обработке в растворе, приводящее при отбеливании к увеличению размера исходных проявленных частиц серебра.

При добавлении к различным отбеливающим растворам йодистого калия образовавшиеся вначале более растворимые соли серебра переходят в менее растворимое йодистое серебро, обладающее хорошей стабильностью к действию света, например,

$$AgCl + KJ = AgJ + KCl, \quad (3.8)$$

$$Ag_4Fe(CN)_6 + 4KJ = 4AgJ + K_4Fe(CN)_6. \quad (3.9)$$

Йодистое серебро может также непосредственно образовываться при отбеливании серебра. Для этого кроме йода могут, например, применяться кислые растворы йодноватой кислоты.

Для проявления исходных пропускающих голограмм в работе [3] применяют выравнивающий проявитель Д-76. Вместе с тем при исследовании использования различных проявителей (УП-2, Д-19, Д-85, Д-76, ДК-20) для получения отбеленных голограмм на фотопластинках ВРЛ оптимальные результаты были получены при их проявлении в проявителях УП-2 и Д-19 [197], а в другой работе — Д-76 [180], что объясняется использованием разных отбеливающих растворов. Разные проявители для проявления исходных голограмм применяются и в других работах.

Первоначально известностью пользовался отбеливающий раствор с хлорной ртутью (10 г/л), при применении которого дифракционная эффективность голограмм увеличивалась до 40—50%. Однако вследствие плохой сохраняемости получаемых голограмм (образующееся при отбеливании хлористое серебро на свету малостабильно), сильной ядовитости хлорной ртути и достижения более высоких характеристик в других отбеливающих растворах данный отбеливающий раствор потерял практическое значение. Не так давно лучшие результаты для отбеленных пропускающих голограмм (с дифракционной эффективностью до 70%) на фотопластинках Кодак 649F и Агфа-Геверт 8Е70 и 10Е70 получались при применении отбеливающего раствора Кодак R-10 с двухромовокислым аммонием и хлористым натрием (или соответственно с бромистым и йодистым калием) [199—203].

Для отбеливания голограмм на фотопластинках типа ВРЛ [197] лучшие результаты (с дифракционной эффективностью до 70%) были получены с отбеливающими растворами с хлорной и бромной медью; для улучшения стабильности к действию света рекомендуется отбеленные голограммы обрабатывать в кислом растворе марганцевокислого калия с бромистым калием. Дифракционная эффективность до 70—75% для голограмм на «прозрачных» фотопластинках ПЭ-1-633 получается при применении отбеливающего раствора с двухромовокислым калием и хлорной медью [204]; несколько позднее было показано, что для обеспечения хорошей стабильности отбеленных голограмм к действию света надо разработанный отбеливающий раствор

Таблица 3.7

Рецептура некоторых отбеливающих растворов для получения фазовых голограмм

Фотоматериал	Рецептура отбеливающих запасных растворов	Способ употребления при 20° С	η_{max}, %
Кодак 649F, Агфа-Геверт 8Е70, 10Е70 и др.	Кодак R-10 Раствор А Двухромовокислый аммоний 20 г Серная кислота концентрированная 14 мл Вода до 1 л Раствор Б Хлористый натрий 45 г (или бромистый калий 20 г) (или йодистый калий 25 г) Вода до 1 л	1 часть раствора А смешивается с 1 частью раствора Б и 10 частями воды Продолжительность обработки — несколько минут	до 70
ВРЛ [197]	Хлорная медь 50 г (или бромная медь 50 г) Вода до 1 л	Продолжительность обработки — несколько минут (до полного отбеливания)	70
«Прозрачные» ПЭ-1-633 [204]	Раствор А Двухромовокислый калий 30 г Серная кислота (уд. в. 1,84) 30 мл Вода до 1 л Раствор Б Сернокислая медь (крист.) 100 г Хлористый натрий 100 г Серная кислота (уд. в. 1,84) 25 мл Вода до 1 л	100 мл раствора А смешивается с 50 мл раствора Б. После 0,5–1-минутной обработки следует промывка	70–75

приготавливать с йодистым калием вместо хлористого натрия. Рецептура некоторых рассмотренных отбеливающих растворов приводится в табл. 3.7.

Отбеливающие растворы с хлорной и бромной медью (табл. 3.7) были применены [205] для получения отбеленных отражательных голограмм на фотопластинках ВРМ с

максимальной дифракционной эффективностью 13% (при проявлении в проявителе УП-2 при экспозиции 1,1 Дж/см²).

Для отбеливания голограмм применяются и другие отбеливающие растворы. Рецептура некоторых из них приводится ниже:

Отбеливатель с красной кровяной солью

Красная кровяная соль	45 г
Бромистый калий	20 г
или йодистый калий	25 г
Вода	1 л

Железный отбеливатель

Бромное железо кристаллическое	70 г
или хлорное железо кристаллическое	50 г
Серная кислота концентрированная	4 мл
Вода	1 л

Отбеливатель с хлорной медью (Кодак ЕВ-3)

Вода	750 мл
Хлорная медь	10 г
Лимонная кислота	10 г
Вода	до 1000 мл

При употреблении приведенные выше растворы отбеливателей разбавляются водой, что устанавливается по пробам (продолжительность отбеливания должна измеряться несколькими минутами).

Для получения отбеленных голограмм представляет интерес применить люминесцентный вираж, описанный Букатиным [208], при обработке в котором серебряного изображения образуется стабильный к действию света салицилат серебра. Как уже отмечалось, Дзюбенко, Пятикоп и Шевченко [193] при исследовании влияния устранения усадки эмульсионного слоя после обработки на дифракционную эффективность отражательных голограмм применяли их отбеливание в растворе железосинеродистого калия с бромистым калием. Голограммы, полученные на фотопластинках Агфа-Геверт 8E75, ВРЛ и ПЭ-1, проявлялись в проявителе Д-19 и затем после фиксирования в кислом фиксаже и промывки полностью отбеливались с некоторой гарантией (плюс 2 мин). Дифракционная эффективность полученных таким образом отбеленных отражательных голограмм после устранения их усадки составляла 45% (при

применении обычного проявления голограмм в бессульфитном пирогаллоновом проявителе с аммиаком — 20%); при применении же процесса обратного отбеливания (растворении восстановленного при проявлении серебра) эффекта не наблюдалось (дифракционная эффективность равнялась 15%).

Высокая дифракционная эффективность как пропускающих, так и отражательных голограмм была получена Грабе [207] при применении разработанного им сухого процесса отбеливания в газообразных хлоре, фторе и парах брома. В этом исследовании использовались голограммы, получаемые на фотопластинках Кодак 649F (с толщиной эмульсионного слоя 17 мкм), 120-02 (толщина слоя 6 мкм) и более крупнозернистых V-F. Дифракционная эффективность пропускающих голограмм, проявленных до оптимальной плотности при отбеливании в парах брома, равнялась 70,8%, в жидком броме — 63,8%, в броме, растворенном в четыреххлористом углероде,— 63,9%, в газообразном хлоре (получаемом как из царской водки, так и в результате реакции соляной кислоты с двухромовокислым калием) — 35%, т. е. примерно в 2 раза меньше, чем при отбеливании в броме. При отбеливании в парах брома отражательных голограмм, проявленных в проявителе Д-19 (D=3,3), максимальная дифракционная эффективность равнялась 73% при уровне шума (за счет светорассеяния) 13% и усадке эмульсионного слоя 3,8%, в то же время для голограмм на фотопластинках Кодак 649F при их обычном отбеливании дифракционная эффективность составляет 11%, а усадка эмульсионного слоя — 11%.

Исследование [207] показало, что оптимальные результаты получаются при проявлении голограмм в среднем по контрастности в проявителе Д-19 (рис. 3.10). Более быстродействующий контрастный проявитель HRD обусловливает более высокий уровень шума. Уменьшение уровня шума связано с падением дифракционной эффективности.

При получении фазовых голограмм, отбеленных в парах брома, дифракционная эффективность остается примерно одинаковой при достаточно широком интервале изменения исходной оптической плотности голограмм (рис. 3.11), что сохраняется и при устранении на них фазового рельефа применением иммерсионной жидкости. Голограммы, отбеленные в парах брома, характеризуются хорошей сохраняемостью сравнительно с обычным отбеливанием в растворах

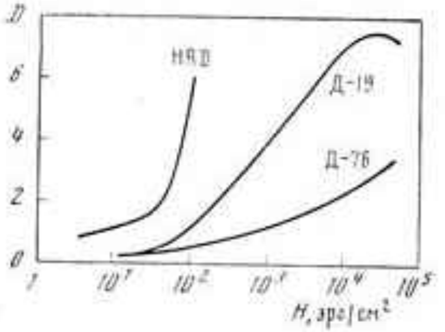


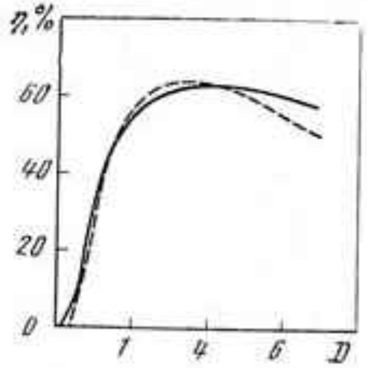
Рис. 3.10. Сравнительные характеристические кривые высокоразрешающих фотопластинок Кодак 120-02 при их 5-минутном проявлении в разных проявителях [207]

двухромовокислого и железосинеродистого калия. Наряду с указанными достоинствами недостатком рассмотренного сухого отбеливания в парах брома является его токсичность (вредное воздействие на кожу и дыхательные органы) и сложность процесса для практического применения.

Рассмотренные данные о применении сухого отбеливания для получения фазовых отражательных голограмм опровергают первоначальные данные об их практической нецелесообразности вследствие достижения недостаточного уровня дифракционной эффективности и повышения шума и указывают на необходимость проведения в этой области дальнейших исследований и разработок. В том числе это относится и к необходимости разработки автоматизированного проявочного оборудования для работы с токсичными газообразными веществами, если не будут найдены другие более подходящие условия отбеливания или сочетания их с обычным проявлением отражательных голограмм до достижения более высокой дифракционной эффективности. Целесообразность получения отбеленных отражательных голограмм заключается в возможности уменьшения экспозиции при голографировании и наличии большого интервала экспозиций с получением оптимальных результатов.

Устойчивость к действию света различных солей серебра (хлористого, бромистого, йодистого, железистосинеродистого и других) и получаемых с их помощью отбеленных (фазовых) голограмм исследовалась разными авторами [197, 201, 203, 207]. Наименее стабильно отбеленное изображение, состоящее из хлористого серебра, которое на свету быстро темнеет. Более стабильно бромистое серебро. Йодистое серебро достаточно устойчиво к действию света, в связи с чем для улучшения сохраняемости отбеленных голограмм их целесообразно обрабатывать в растворе йоди-

Рис. 3.11. Зависимость дифракционной эффективности η фазовых отражательных голограмм при их отбеливании в парах брома от оптической плотности *D* исходных голограмм до устранения (*1*) и после устранения (*2*) фазового рельефа (измерения с иммерсией) [207]



стого калия. В работе [197] указывается, что для улучшения стабильности отбеленных голограмм, кроме дополнительной обработки в разных растворах, их необходимо получать в сильно задубленном эмульсионном слое, в результате чего они становятся мало восприимчивыми к действию атмосферы. Однако при экспериментальной проверке этого метода дифракционная эффективность получаемых таким способом голограмм была небольшой (10—20%).

Перевод отбеленного серебра в более стойкое йодистое серебро и сильное задубливание эмульсионного слоя с последующим нагреванием голограмм в атмосфере азота для улучшения их стабильности описывается в работе [168]. Недавно было опубликовано исследование [209] о применении стабилизации отбеленных голограмм на фотопластинках ВРЛ-633 путем их обработки в растворах фотографических стабилизаторов, антивуалирующих веществ или десенсибилизирующих красителей.

Отбеливание голограмм может проводиться как в ходе общего процесса их обработки (после фиксирования и промывки), так и применительно к готовым голограммам. В табл. 3.8 приводится последовательность и продолжительность отдельных операций обработки высокоразрешающих фотоматериалов при получении на них отбеленных голограмм. Проявление голограмм в выравнивающем проявителе Д-76 (вместо Д-19) позволяет снизить шумы при восстановлении голограмм, хотя голографическая чувствительность выше при проявлении в проявителе Д-19.

В заключение следует рассмотреть интересный процесс обработки высокоразрешающих фотопластинок Агфа-Геверт 10Е70 и Кодак 649F с применением отбеливания

Таблица 3.8

Последовательность и продолжительность отдельных операций обработки высокоразрешающих фотоматериалов (Кодак 649F и др.) при получении на них фазовых (отбеленных) голограмм [3]

Операции	Раствор и условия обработки	t, мин (при 20° C)
Проявление	Проявитель Д-76 (при перемешивании)	5
Промывка	В проточной воде	0,5
Фиксирование	Быстроработающий фиксаж Кодак	5
Промывка	В проточной воде	0,5
Удаление компонентов фиксажа	Осветляющий раствор (удалитель тиосульфата) Кодак	1,5
Промывка	В проточной воде	5
Удаление сенсибилизатора (красителя)	Обработка в метаноле	5
Промывка	В проточной воде	1
Отбеливание	В 5%-ном растворе железосинеродистого калия	3
Промывка	В проточной воде	5
Обезвоживание	1. В денатурированном спирте 2. В изопропиловом спирте	1,5 1,5
Сушка	Сдувание избытка изопропилового спирта струей сухого воздуха	–

получаемых голограмм, разработанный Пеннингтоном, Харпером и Ламингом [206]. В этом процессе сочетается высокая светочувствительность галогенидосеребряных фотоматериалов с высокими качеством и дифракционной эффективностью голограмм, получаемых на хромированной желатине. Сущность данного процесса с последовательностью и продолжительностью отдельных операций иллюстрируется в табл. 3.9 и не требует дополнительных пояснений. Дифракционная эффективность фазовых голограмм в рассматриваемом процессе в небольшом интервале составляет около 100%, а в среднем — 60%. Для достижения высоких характеристик при осуществлении процесса надо обращать внимание на тщательность проведения его отдельных стадий. Нельзя, однако, не иметь в виду сложность рассмотренного процесса (21 операция), что вызывает большие трудности при его практическом осуществлении.

Таблица 3.9

Последовательность и продолжительность отдельных операций получения высококачественных фазовых голограмм на высокоразрешающих фотопластинках Агфа-Геверт 10E70 и Кодак 649F [206]

Операция	Раствор и условия обработки	t, мин
Снятие напряжений с эмульсионного слоя	Выдерживание в атмосфере высокой влажности	0,5–1 сут
Сушка	Обычная (в шкафу для фотопластинок)	–
Экспонирование	Обычное экспонирование голограмм (различными лазерами)	–
Предварительное дубление	Дубящая ванна Кодак *SH*-5 с перемешиванием (сульфат натрия безводный 50 г, углекислый натрий безводный 10 г, нитробензимидазол 0,5%-ный 40 мл, формалин 40%-ный 5 мл, вода до 1 л)	2
Промывка	В проточной деионизованной воде	3
Проявление	Проявитель Д-19 (с перемешиванием в токе азота)	5
Стоп-ванна	С перемешиванием	0,5–1
Фиксирование	Обычный (недубящий) фиксаж с перемешиванием	2–5
Промывка	Проточная деионизованная вода	10
Отбеливание	В отбеливателях с железосинеродистым калием R-10, с бромной медью и др. (бромная медь 40 г, лимонная кислота моногидрат 100 г, вода до 1 л)	После осветления еще 2 мин
Промывка	В проточной деионизованной воде	5
Очувствление	Раствор двухромовокислого аммония 4–16%-ный	4–5
Сушка	Полное отсутствие пыли, комнатная температура и влажность с замкнутым циклом или в эксикаторе	–

Таблица 3.9 (окончание)

Операция	Раствор и условия обработки	t, мин
Экспонирование (засветка)	Под аргоновым лазером ($\lambda=488$ нм) или ультрафиолетовым светом (хуже) до тех пор, пока прозрачность слоя уменьшается до 30–40% от первоначальной (экспонирование проводится под углом Брегга)	–
Промывка и осветление	В 20%-ном растворе бисульфита натрия (до исчезновения желто-оранжевой окраски слоя)	–
Промывка	В проточной деионизованной воде	3
Фиксирование	С перемешиванием	1–2
Промывка	В проточной деионизованной воде	3
Горячая промывка (для образования рельефа)	В горячей воде (~60° С) до отмывания незадубленной желатины	16–45
Обезвоживание	100%-ный изопропиловый спирт (до визуального наблюдения максимальной дифракционной эффективности на отражение)	0,5–1
Сушка	В атмосфере сухого азота	Быстрая

3.6. Обработка готовых голограмм

Рассмотренные процессы дополнительной обработки голограмм, относящиеся к уменьшению усадки эмульсионного слоя, улучшению его равномерности, отбеливанию и т. д., могут проводиться не только в ходе общего процесса обработки, но и с готовыми голограммами для улучшения их качества. К таким процессам относятся также возможное усиление и ослабление голограмм, их тонирование, защитное покрытие, что находило применение в липпмановском способе цветной интерференционной фотографии.

При рассматривании голограмм, в частности получаемых во встречных пучках, можно заметить наличие

отдельных небольших пятнышек, часто зеленоватого или красноватого цвета, резко отличающихся от общего цвета голографического изображения. Наличие этих пятнышек, во многих случаях связывается с разной толщиной эмульсионного слоя в этих местах, что может объясняться жировыми или другими вкраплениями, случайно получаемыми при изготовлении или обработке голограмм. Для их устранения голограммы можно дополнительно обработать в слабом растворе смачивателей (СВ-104, 1017 и др; ~1 г/л), в этиловом спирте с постепенно повышающейся концентрацией, изопропиловом спирте, а затем высушивать, обеспечивая их равномерную сушку. Такую обработку можно совместить с обработкой в растворе пластифицирующих или гигроскопических веществ для устранения усадки эмульсионного слоя, улучшения цвета готовых голограмм. Как и в ходе общего процесса обработки, для этого могут применяться 1—2%-ные растворы триэтаноламина, глицерина и других веществ (устанавливается по пробам) с добавлением в них смачивателей и спирта. При необходимости подобная обработка может повторяться для достижения требуемого результата. При этом может улучшаться яркость (дифракционная эффективность) обработанных голограмм.

Изменение цвета голограмм при соответствующем изменении толщины эмульсионного слоя можно просто и наглядно наблюдать, если на него подышать (для увлажнения слоя) и затем быстро рассматривать голограмму. Такой прием находил применение и в практике цветной интерференционной фотографии. При этом интерференционное изображение может даже совсем исчезнуть за счет большой влажности атмосферы и сильного увеличения толщины эмульсионного слоя при его увлажнении (хранение в атмосфере с высокой влажностью и др.). Для устранения вредного влияния на качество интерференционного изображения имеющихся дефектов в поверхностном слое при рассматривании липпмановских цветных фотографий применялась специальная кювета с бензолом, в которую наклонно помещалась рассматриваемая фотография. Для устранения возможного изменения цвета цветных интерференционных фотографий они со стороны эмульсионного слоя покрывались тонким слоем защитного прозрачного лака. Для длительной сохраняемости требуемого цвета голограмм их также рекомендуется покрывать защитным

нитролаком или стеклянными пластинками с обклеиванием их по бокам [168].

Для достижения требуемых результатов при обработке липпмановских цветных интерференционных фотографий использовали различные процессы усиления, ослабления и тонирования [8, 9]. Данные процессы могут применяться и для улучшения качества современных голограмм. Для усиления цветных фотографий применялось отбеливание их в разных растворах с последующим чернением (в растворах сернистокислого натрия, железного, пирогаллолового, амидолового и родиналового проявителей). Интересным является физическое усиление, для которого используется следующий раствор:

Вода	100 мл	Сульфит натрия	24 г
Роданистый аммоний	24 г	Тиосульфат натрия	5 г
		Бромистый калий, 10%-ный раствор	6 капель
Азотнокислое серебро	4 г		

При употреблении 5 мл этого раствора смешивается с 54 мл воды и с 2 мл родиналового проявителя. После усиления пластинки фиксируются и хорошо промываются.

Для ослабления липпмановских цветных фотографий применялся разбавленный раствор фармеровского ослабителя:

Раствор А		Раствор Б	
Тиосульфат натрия	10 г	Красная кровяная соль	2 г
Вода	50 мл	Вода	10 мл

При употреблении смешивается 10 мл раствора А, капля раствора Б и 150 мл воды.

Обработка проявленных и отфиксированных голограмм в слабых растворах железосинеродистого калия с тиосульфатом натрия и двухромовокислого калия с серной кислотой рекомендуется для некоторых современных голографических материалов для улучшения резкости края.

Для улучшения цветопередачи или при наличии большого содержания аммиака в пирогаллоловом проявителе рекомендовалось применять ослабление в персульфатном ослабителе [8]:

Персульфат аммония	2 г
Вода	100 мл
Серная кислота	10 капель

Таблица 3.10

Влияние процессов усиления, ослабления и вирирования пропускающих голограмм на их дифракционную эффективность [210]

Раствор	η, %	
	исходная	после обработки
Физический усилитель	4,5	4,4
Хромовый усилитель	2,3	2,5
Урановый усилитель	2,3	0,7
Фармеровский ослабитель	3,5	4,5
Хромовый ослабитель	3,5	24,0
Марганцевокислый ослабитель	3,5	3,5
Персульфатный ослабитель	3,5	3,5
Сернистый вираж	3,4	8,5
Красно-фиолетовый вираж (с серно-кислой медью)	3,4	3,7
Люминесцентный вираж (с тиосалициловой кислотой)	3,4	18,0

Тонирование липпмановских цветных фотографий проводилось в ванне с роданистым золотом.

Влияние процессов усиления, ослабления и тонирования на дифракционную эффективность пропускающих и отражательных голограмм исследовалось Масленковой, Петренко, Кирилловым и др. [210]. В качестве исходных использовались голограммы, полученные в сходящихся пучках на «прозрачных» фотопластинках ПЭ-1-633 с разной исходной плотностью почернений. В голограммах предварительно измерялась их дифракционная эффективность и затем они подвергались соответственно усилению, ослаблению и вирированию в различных растворах, после чего вновь измерялась дифракционная эффективность.

Из полученных в работе [210] результатов (табл. 3.10). можно видеть, что при обработке голограмм в некоторых усилителях, ослабителях и виражах их дифракционная эффективность может значительно увеличиваться. При этом надо иметь в виду, что достигаемые результаты зависят от плотности исходных голограмм, продолжительности обработки и разбавления водой используемых растворов. В некоторых случаях, например для хромового ослабителя,

получаемый эффект можно связывать с образованием фазовых голограмм. Важное значение при применении процессов усиления, ослабления и вирирования имеет равномерность обработки штрихов решеток во всей толще эмульсионного слоя, что достигается соответствующим разбавлением растворов. Результаты исследования показывают, что применение процессов усиления, ослабления и вирирования голограмм может представлять практический интерес.

3.7. Проявочное оборудование для обработки голограмм

Результаты, получаемые при обработке кинофотоматериалов, в том числе и высокоразрешающих голографических материалов, определяются не только рецептурой используемых обрабатывающих растворов и прежде всего проявителей, но не в меньшей мере условиями или способами обработки, а именно интенсивностью перемешивания растворов, предварительного пропитывания ими эмульсионных слоев и затем завершения в другом рабочем растворе, обработкой с наносом растворов и т. д. [179]. В связи с этим предприятия, изготавливающие современные кинофотоматериалы, стали рекомендовать для их обработки как рецептуру обрабатывающих растворов и режимы обработки, так и требуемое для их осуществления автоматизированное проявочное оборудование, поскольку без этого не может гарантироваться необходимое качество фотографического изображения.

Однако все это пока не учитывается в голографии. Обработка голограмм проводится в обычных лабораторных условиях в кюветах без необходимого контроля свойств обрабатывающих растворов и всего процесса. Объясняется это тем, что голография лишь начинает переходить в стадию опытно-конструкторских разработок. Возникает потребность в применении проявочного оборудования, как это описано при использовании методов голографической интерферометрии в неразрушающем контроле изделий. Применяемые для данных целей портативные проявочные устройства представляют собой бачки с держателями для фотопластинок, в которые последовательно заливаются проявляющие, фиксирующие и другие растворы, а также проводится промывка обработанного материала. Описаны

устройства и приспособления для обработки фотопластинок непосредственно во время экспонирования, когда, например, дном образующейся кюветы служит верхняя грань призмы, используемой при голографировании [2, 211].

Для обработки голографических фотоматериалов в лабораторных условиях представляют практический интерес некоторые типы проявочных приборов и устройств, применяемых в лабораторном контроле процесса изготовления, выпуска и приемки различных кинофотоматериалов, их обработки в профессиональной и любительской фотографии и для разных научно-технических целей. Понятно, что в связи с различием режимов и продолжительности обработки голографических фотоматериалов и наличия для них ряда дополнительных стадий обработки указываемые проявочные приборы и устройства могут потребовать некоторых видоизменений и дополнительных приспособлений. Однако и при этом необходимо использовать большой опыт их практического применения. Надо иметь в виду, что быстрые процессы проявления, хотя и не находят широкого применения в голографии, но уже начинают разрабатываться. Пока же обычно считается, что наиболее эффективно тонкая микроструктура голографического изображения выявляется в процессе медленного проявления в разбавленных выравнивающих проявителях, когда можно в известной мере регулировать размер частиц проявляемого серебра и получать их минимально возможными.

Для обработки голографических фотопластинок и форматных фотопленок небольшого размера представляется возможным использовать имеющиеся лабораторные приборы для обработки сенситограмм [212] с переделкой держателей сенситограмм применительно к обрабатываемому размеру фотопластинок или пленок. В данных приборах осуществляется интенсивное перемешивание растворов и требуемая продолжительность обработки и температурные режимы устанавливаются с помощью программного устройства.

Представляется, что без значительных переделок и приспособлений могут использоваться имеющиеся проявочные устройства для быстрой обработки форматных рентгенопленок, но с соответствующим увеличением в них продолжительности обработки голографических фотоматериалов. Подобным же образом могут использоваться проявоч-

ные устройства карусельного типа, получившие большое распространение для обработки форматных цветных пленок и фотобумаги. В этих устройствах обрабатываемый материал в соответствии с установленной программой их обработки периодически поднимается, затем опускается в последующий бак с растворами и т. д., после чего подобным же образом промывается и далее высушивается. Применяются также устройства с одним баком, из которого последовательно удаляются использованные растворы и в него заливаются другие, как, например, это применяется в известных бачках для обработки небольших кусков рольной или форматной пленки.

Для обработки бóльшего метража голографической фотопленки могут применяться имеющиеся разнообразные проявочные устройства с непрерывным передвижением пленки в баках с обрабатывающими растворами и затем ее промывкой (обычно душевой) и сушкой.

Глава 4

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ И КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ИХ ОБРАБОТКИ

4.1. Общая характеристика методик испытания голографических фотоматериалов

Оценка качества высокоразрешающих фотоматериалов для голографии встречает серьезные трудности, обусловливаемые исключительной тонкостью необходимых методик для их резольвометрической, частотно-контрастной, дисперсионной, физико-химической и голографической характеристики. Достаточно указать, например, что надо уметь определять разрешающую способность порядка 10 000—20 000 лин/мм и более, измерять линейные размеры эмульсионных зерен в несколько нанометров, оценивать 1%-ную усадку эмульсионного слоя после обработки, или, иначе, измерять толщину эмульсионного слоя с точностью менее 0,1 мкм. Надо также иметь в виду, что интересующие нас исходные данные о связи структуры различных объектов со структурой получаемых объемных голограмм пока ограничиваются лишь общей постановкой вопроса и предварительными результатами исследований. При этом обычно проводимая оценка качества получаемых голограмм лишь по их дифракционной эффективности недостаточна и должна быть дополнена определением отношения полезного сигнала к шуму, усадкой слоя после обработки и др.

К изложенному следует добавить, что рассмотрение эмульсионного слоя как трехмерной среды, во всей толще которой формируется голографическое изображение, пока изучено совершенно недостаточно, в том числе электронно-микроскопическими и микроскопическими методами. Недостаточно изучен эмульсионный слой как трехмерная среда применительно к формированию в нем по глубине обычного фотографического (оптического) изображения [213, 214], что может объясняться сложностью и тонкостью необходимых для этого исследований. Все это указы-

Таблица 4.1

Общая характеристика различных методик испытания высокоразрешающих фотоматериалов для голографии

Испытания	Проводимые определения
Общесенситометрические	Светочувствительность (общая, эффективная и для различных монохроматических излучений), коэффициент контрастности, уровень вуали, максимальная плотность, фотографическая широта
Спектросенситометрические	Кривая спектральной светочувствительности фотоматериала, ее максимальные значения при различных длинах волн
Структурные	Зернистость и гранулярность, разрешающая способность, резкость, ЧКХ, шумы, дисперсионные характеристики, микроструктура изображения и др.
Химико-аналитические, физико-химические и физико-механические	Содержание серебра и желатины, толщина эмульсионного слоя, степень его задубленности и прочность при обработке, механические дефекты и др.
Голографические	Кривая амплитудного пропускания, голографическая и экспозиционная светочувствительность, дифракционная эффективность и ее оптимальные значения, шумы и отношение полезного сигнала к шуму, экспозиционные характеристики, усадка эмульсионного слоя, ориентационная чувствительность и др.

вает на необходимость постановки более полных и обстоятельных исследований по оценке качества высокоразрешающих фотоматериалов для голографии и получаемых на них различных голограмм.

Вместе с тем в практике голографии во многом уже определились основные методики различных испытаний голографических фотоматериалов, которые в разных видоизменениях находят практическое применение. Эти методики включают в себя общесенситометрические, спектросенситометрические, структурные, химико-аналитические, физико-химические и голографические испытания, общая характеристика которых приводится в табл. 4.1. Различные методики испытаний голографических фотоматериалов пока не унифицированы и применяются в разных видоизменениях. Этим во многом может объясняться различие в характеристиках одних и тех же фотоматериалов, указываемых разными авторами.

Для оценки качества высокоразрешающих фотоматериалов для голографии все больше начинает применяться их голографическая характеристика в основном по экспозиционной или энергетической светочувствительности и достигаемой максимальной дифракционной эффективности. Объясняется это тем, что по обычным для фотографии общесенситометрическим, резольвометрическим, физико-химическим и физико-механическим испытаниям не может быть оценено голографическое качество высокоразрешающих фотоматериалов, при этом определенная корреляция этих характеристик пока не установлена и, надо полагать, практически нереальна. Вместе с тем для сравнительной оценки качества голографических фотоматериалов в общем ассортименте выпускаемых различных кинофотоматериалов их обычные фотографические, физико-химические и другие испытания нельзя отбрасывать.

Одним из основных вопросов сравнительной оценки различных свойств голографических фотоматериалов является не только унификация различных методик их испытаний, но и применяемых в них контрольно-измерительных приборов.

4.2. Общесенситометрические и спектросенситометрические испытания

Характеристика фотографической и голографической светочувствительности высокоразрешающих фотоматериалов для голографии была рассмотрена выше (см. разд. 2.3). Определение светочувствительности и других фотографических показателей кинофотоматериалов входит в задачу специального раздела научной фотографии, называемого сенситометрией, и на проводимых общесенситометрических и спектросенситометрических испытаниях следует остановиться подробнее.

Общесенситометрические испытания кинофотоматериалов проводятся по отношению к регламентированному белому (дневному свету и свету ламп накаливания)

с экспонированием при различном освещении в специальных приборах, называемых сенситометрами [215]. В современных сенситометрах регулирование количества освещения сенситограмм проводится по шкале интенсивности с экспонированием фотоматериала под ступенчатым клином или другим способом. Продолжительность экспонирования составляет сотые — десятые доли секунды; для малочувствительных фотоматериалов она может увеличиваться.

Экспонированные в сенситометре полоски испытуемого фотоматериала проявляются в установленных контрольных проявителях, обычно используемых в практике обработки кинофотоматериалов, фиксируются, промываются и высушиваются. Оптические плотности различных полей полученных сенситограмм измеряются на денситометре, и по результатам измерений строятся характеристические кривые, представляющие собой зависимость оптических плотностей проявленных почернений от логарифма количества освещения (экспозиции) при экспонировании. По построенным характеристическим кривым определяются сенситометрические показатели фотоматериала: светочувствительность, коэффициент контрастности, вуаль, максимальная плотность и фотографическая широта. Эти определения проводятся по отношению к характеристической кривой с установленным для конкретного фотоматериала коэффициентом контрастности (с построением для этого кривой зависимости коэффициента контрастности от продолжительности проявления). Нормальные коэффициенты контрастности для негативных кинопленок обычно составляют 0,6—0,7, негативных фотопленок — 0,8—1,0, позитивных пленок — 2,0—2,5, пленок для микрофильмирования — 4—5.

Кроме общей светочувствительности, измеряется так называемая эффективная светочувствительность фотоматериала при съемке с различными светофильтрами. Она определяется при экспонировании в сенситометре с дополнительным желтым (ЖС-18), оранжевым (ОС-14) и красным (КС-14) светофильтрами.

В разных системах сенситометрии светочувствительность определяется по различным критериям, обычно по некоторой оптической плотности почернения сверх вуали. Светочувствительность различных фотоматериалов обычно определяется по точке на характеристической кривой, со-

ответствующей оптической плотности сверх вуали, и выражается в единицах, обратных количеству освещения H ($лк^{-1}\cdot с^{-1}$), например:

$$S_{0,2}=1/H_{D_0+0,2}, \tag{4.1}$$

$$S_{0,85}=10/H_{D_0+0,85}. \tag{4.2}$$

Методика измерения монохроматической энергетической светочувствительности голографических фотоматериалов с их экспонированием в обычном сенситометре за соответствующим интерференционным светофильтром (для излучений различных лазеров) разработана Андреевым, Пташенчук и др. [216] и находит практическое применение при испытании отечественных фотоматериалов для голографии. По результатам испытаний, как и обычно, строятся характеристические кривые и по ним определяются сенситометрические показатели испытуемого фотоматериала. В контрольных испытаниях проявление фотоматериалов проводится в проявителях УП-2 или Д-19 с продолжительностью проявления 5—10 мин при нормальной температуре (20° С). Калибровка получаемых в сенситометре количеств освещения с интерференционными светофильтрами проводится по результатам сравнительных спектросенситометрических испытаний для заданной длины волны.

Из результатов работы [216] следует, что получаемые для монохроматического освещения (в том числе лазерного) характеристические кривые фотоматериала и кривые невзаимозаместимости при коротких экспозициях являются практически такими же, что и при обычном сенситометрическом испытании с экспонированием белым светом. Отсюда вытекает, что градационные характеристики голографических фотоматериалов можно определять при их экспонировании с интерференционным светофильтром, а явление невзаимозаместимости можно исследовать при экспонировании белым светом. Недостатком рассмотренной методики является необходимость длительной выдержки при экспонировании с интерференционным светофильтром (не менее 10 с), а в связи с этим и невозможность проводить исследования при коротких выдержках. Этим недостатком не обладает разработанный в этой же работе [216] лазерный сенситометр, в котором в качестве источника света применяются различные лазеры с нормирован-

пым освещением. Следует, однако, заметить, что стабилизация работы лазера с нормируемыми в сенситометрии небольшими допусками в колебаниях количества освещения при экспонировании осуществляется более сложно, чем стабилизация обычных проекционных ламп, и имеющийся в этом отношении опыт пока является небольшим.

Спектросенситометрические испытания кинофотоматериалов проводятся для определения величины их энергетической спектральной светочувствительности (по отношению к различным монохроматическим излучениям) с применением специальных приборов — спектросенситометров. Спектральная светочувствительность отечественных кинофотоматериалов определяется с помощью спектросенситометра, разработанного Гороховским [215]. Этот прибор позволяет определять спектральную светочувствительность различных фотоматериалов в пределах видимой и близкой инфракрасных областей спектра. Изменение в нем количества освещения производится по шкале интенсивности при постоянной выдержке. Получаемые спектросенситограммы проявляются до заданного коэффициента контрастности в тех же проявителях, что и при общесенситометрическом испытании.

Спектральная светочувствительность фотоматериала S_λ вычисляется в энергетических единицах (см²/эрг) по критерию оптической плотности 1,0 над вуалью по формуле

$$S_\lambda = 1/H_\lambda, \qquad (4.3)$$

где H_λ — количество монохроматического освещения, выражаемое в эрг/см².

Кривая спектральной светочувствительности фотоматериала строится в виде зависимости lg S_λ от длины волны монохроматических излучений λ.

Собственная спектральная светочувствительность обычных несенсибилизированных бромойодосеребряных кинофотоматериалов ограничивается коротковолновой частью спектра. При ортохроматической сенсибилизации она начинает охватывать зеленую часть спектра, а при панхроматической — длинноволновую красную часть спектра с некоторым провалом в зеленой части. При изопанхроматической сенсибилизации светочувствительность является примерно равномерной для всех частей спектра. Кривые спектральной светочувствительности голографиче-

ских фотоматериалов обычно охватывают более узкие зоны спектра, соответствующие излучениям различных лазеров. Но имеются и фотоматериалы с широкой зоной сенсибилизации ко всему видимому спектру для цветного голографирования.

Поскольку, как уже отмечалось, оптимальная дифракционная эффективность обычных пропускающих голограмм достигается при их оптической плотности примерно 0,5, то по этой же плотности сверх вуали определяется и спектральная светочувствительность голографических фотоматериалов. Кривые спектральной светочувствительности различных фотоматериалов для голографии приведены на рис. 2.3.

4.3. Структурные свойства

Структурные свойства фотографического изображения служат характеристикой его качества и качества используемых для него фотоматериалов. Их определение представляет собой важный самостоятельный раздел фотографической науки и техники [48, 215, 217], в задачу которых входит разработка необходимых методик и определение зернистой структуры изображения, разрешающей способности, ЧКХ, резкости и мутности эмульсионного слоя, фотометрического эквивалента. Дифракционная эффективность, шумы, отношение полезного сигнала к шуму и другие голографические характеристики также служат для оценки качества высокоразрешающих фотоматериалов для голографии и структурных свойств получаемых на них голограмм.

Зернистость и гранулярность. Зернистая структура проявленного изображения является одной из важных характеристик кинофотоматериалов и зависит от многих факторов: дисперсионных характеристик исходного материала, оптической плотности почернения, при котором проводится определение, экспозиции, при которой получены данная плотность почернения, состава используемого проявителя, продолжительности проявления и др. Как уже ранее отмечалось, размеры эмульсионных зерен голографических фотоматериалов очень небольшие (диаметр примерно от 5—10 до 100 нм) при небольшом содержании в них галогенидов серебра. Это обусловливает, как можно полагать, получение некоторых необычных результатов при их про-

явлении, что вызывает практический интерес к исследованию связи между размером зерен фотоматериала и структурой проявляемого изображения.

Для суждения о неоднородности (негомогенности) проявленного изображения в научной фотографии применяют термины зернистость и гранулярность. Обычно под зернистостью понимается субъективное восприятие наблюдателем неоднородности фотографического изображения, а под гранулярностью — объективная характеристика этой неоднородности. Однако это не всегда соблюдается и один и тот же термин «зернистость» применяется для обоих понятий неоднородности фотографического изображения.

Для определения гранулярности фотографического изображения используют различные методы, большей частью основанные на определении увеличения изображения, при котором становится заметным его зернистое (неоднородное) строение. На этом принципе основан и применяемый у нас гранулометр Гороховского [215]. Нельзя, однако, не заметить, что отмеченные выше весьма высокие дисперсионные характеристики голографических фотоматериалов указывают на то, что данный прибор может практически использоваться для измерения гранулярности голографического изображения, полученного лишь на менее высокодисперсных голографических фотоматериалах.

При проецировании кинематографического изображения на экране наблюдается его динамическая зернистость, выражаемая в так называемом кипении изображения, наиболее заметном при оптической плотности почернений около 0,7—0,8. В какой мере подобное явление может быть выявлено при рассматривании голографического киноизображения, пока неизвестно.

Для характеристики зернистости фотографического изображения в последнее время стала применяться методика изменения шума, заимствованная из радиоэлектроники и телевидения. Под шумом понимается средняя квадратичная флуктуация числа неперекрытых проявленных зерен на равномерно засвеченном проявленном участке слоя. Отсюда для оценки качества фотографических материалов начинают применять определение для них отношения полезного сигнала к шуму. Эти характеристики используют и для оценки качества голографических фотоматериалов.

Разрешающая способность. С зернистым строением фотографических слоев связана и другая их важная характеристика — разрешающая способность, представляющая собой свойство слоя передавать раздельно мелкие детали, близко расположенные друг к другу. Разрешающая способность кинофотоматериалов выражается максимальным числом линий на 1 мм слоя, которые можно наблюдать при рассматривании в микроскоп при небольшом увеличении (в 30—50 раз и больше) специально снятого штрихового

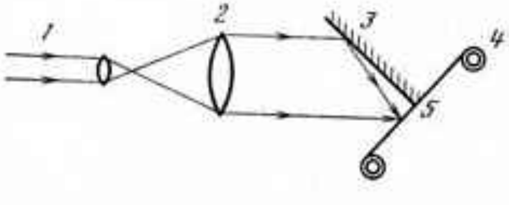


Рис. 4.1. Схема лазерного резольвометра [2]

1 — лазерный луч; 2 — линза; 3 — зеркало; 4 — фотоматериал; 5 — ось поворота

тест-объекта (штрихов разного размера абсолютного контраста), называемого мирой. Определение разрешающей способности проводится специальным прибором — резольвометром. Для испытания отечественных кинофотоматериалов применяется проекционный резольвометр, разработанный Бурмистровым [215]. Получаемые резольвограммы проявляются в тех же проявителях, что и при общесенситометрическом испытании кинофотоматериалов.

Проекционные резольвометры позволяют определять разрешающую способность примерно до 1500—2000 лин/мм. Более высокую разрешающую способность примерно до 5000 лин/мм можно определить с помощью интерференционных резольвометров.

Схема работы лазерного интерференционного резольвометра, разработанного Островским [2], показана на рис. 4.1. Прибор разработан в двух вариантах — для определения разрешающей способности фотопластинок и 35-миллиметровых кинопленок — и представляет собой приставку к гелий-неоновому лазеру. Свет от лазера проходит через линзу и затем в виде двух симметричных лучей с помощью зеркала падает на испытуемый фотоматериал. Изменение регистрируемой пространственной частоты достигается простым поворотом зеркала. Регистрируемая пространственная частота определяется по углу между интерферирующими симметричными лучами. Применение в качестве источника света более коротковолнового

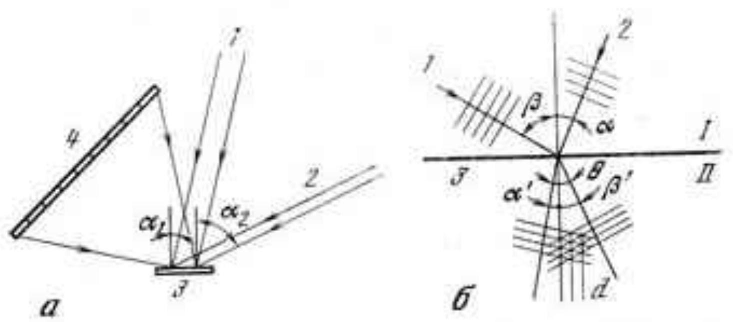


Рис. 4.2. Схемы определения разрешающей способности интерференционным методом с помощью специальной отградуированной шкалы [63]

1 — объектный луч; 2 — опорный луч; 3 — фотопластинка; 4 — шкала

аргонового лазера дает возможность проводить определения до более высоких значений разрешающей способности.

Нассенштейн, Деден, Метц и др. [63] для быстрой оценки влияния процесса обработки фотоматериала на разрешающую способность применяли интерференционный метод со съемкой специально отградуированной шкалы (в единицах измерения разрешающей способности), нанесенной на диффузно отражающий экран, который расположен под некоторым углом к испытуемому фотоматериалу (рис. 4.2). В зависимости от наклона опорного пучка на фотоматериале могут регистрироваться разные пространственные частоты, в положении *а* — до 2000 лин/мм, в положении *б* — до 3000 лин/мм. Ковачев [218] для измерения разрешающей способности голографических фотоматериалов примерно до 3000 лин/мм применяет определение порядка дифракции при копировании на них специального текста с контрастом от 0,3 до 0,5.

Прусс и Мациевич [69] указывают, что интерференционный метод определения разрешающей способности хотя и позволяет по сравнению с проекционным методом определять ее более высокие значения, но все же имеет ограничение. Последнее заключается в том, что многие голографические фотоматериалы дают возможность разрешать весь диапазон частот интерференционного резольвометра, поэтому разные материалы нельзя различить между собой. В связи с этим предложено регистрировать на исследуемых материалах интерференционные полосы пониженного контраста, что уменьшает получаемые численные значе-

ния разрешающей способности и таким образом позволяет дифференцировать разные материалы. Определяемые таким способом характеристики затем по экстраполяции пересчитываются в величины разрешающей способности при ее обычном измерении с мирой абсолютного контраста (равного единице).

Подобные вычисления были проведены по отношению к полученным определениям для миры с пониженным контрастом как проекционным, так и интерференционным методами и, по мнению авторов [69], показали удовлетворительные результаты, с чем, однако, нельзя согласиться. Как уже отмечалось, экстраполяция результатов измерений разрешающей способности проекционным методом дает заниженные результаты для особовысокодисперсных фотоматериалов (ПЭ и ЛОИ-2). Более близкие (к действительным) данные получены при экстраполяции результатов измерений интерференционным методом.

Мутность и резкость. При экспонировании равномерным светом фотоматериалов, часть поверхности эмульсионного слоя которых предварительно закрыта плотно прижатым лезвием бритвы, можно наблюдать, что после проявления не обнаруживается резкой границы почернений у края лезвия. Получаемая при этом нерезкость изображения границы обусловливается светом, рассеянным эмульсионными зернами, и характеризует фотографическую мутность эмульсионного слоя, которая у разных фотоматериалов может быть различной. С мутностью фотографического слоя тесно связана резкость проявленного изображения, мерой которого служит скорость изменения оптической плотности почернений на геометрической границе изображения края лезвия. Количественно она измеряется по микрофотометрической записи изменения оптических плотностей почернений в направлении, перпендикулярном к краю лезвия. Резкость фотографического изображения зависит от местных эффектов проявления (линий Маки, бордюра) [179].

Деформация и смещение изображения. При необходимости измерения геометрических размеров объектов съемки по результатам их воспроизведения в фотографическом изображении необходимо иметь в виду наличие в нем различных погрешностей и искажений. Последние связываются не только с качеством используемых объективов, и формированием оптического изображения снимаемых

объектов, но и с процессом проявления и последующей обработки экспонированного материала. При проявлении могут происходить местное задубливание эмульсионного слоя (что приводит к его деформации), различные местные эффекты проявления и другие избирательные процессы, которые могут приводить к изменению размеров изображения, в особенности по отношению к малым деталям и на границе двух различных почернений.

Искажение изображения при экспонировании во многом обусловливается ореолообразованием, возникающим вследствие сильного рассеяния света в местах сильно освещенных деталей, например электрических лампочек. Для уменьшения ореолообразования применяется различная противоореольная защита эмульсионного слоя, что одновременно также значительно повышает и резкость изображения.

Сенсирезольвометрические и диффузометрические испытания. Для характеристики структурных свойств различных кинофотоматериалов большое значение имеет передача и воспроизведение ими различных мелких деталей. Интересным направлением в их оценке является построение так называемых сенсирезольвометрических кривых, которые выражают зависимость разрешающей способности от экспозиции при печати миры. Для этого комплект одинаковых мир, наложенных на поля ступенчатого клина, экспонируется в сенситометре и обрабатывается в условиях, применяемых для испытуемого фотоматериала. Разными авторами описаны разные методики сенсирезольвометрических испытаний применительно к условиям использования различных фотоматериалов.

Для количественной оценки рассеяния и отражения света в эмульсионных слоях применяется методика так называемых диффузометрических испытаний, результаты которых выражаются в виде функции контрастности, представляющей собой эмпирическую зависимость фотографического контраста черных полосок от их толщины. По ГОСТ 10891-64 на негативные пленки для микрофильмирования при испытании используется 19 элементов тест-объекта, представляющего собой черные полоски разной ширины (от 12,5 до 100 мкм), размещаемые на полях сенситометрического ступенчатого клина. После экспонирования в сенситометре с тест-объектом исследуемый фотоматериал обрабатывается и полученные

диффузиграммы промеряются на микрофотометре. По результатам измерений значений логарифма отношения интенсивности света (экспозиций), соответствующих черным полоскам тест-объекта и полям клина, определяется диффузометрический коэффициент $K_р$. Малые значения этого коэффициента соответствуют более высокому качеству фотоматериала в отношении меньшего светорассеяния в нем и более высокой резкости изображения.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ). Объективная оценка качества фотографического изображения, его резкость и передача мелких деталей наиболее полно оценивается так называемой частотно-контрастной характеристикой фотоматериала, под которой понимается функция, позволяющая представлять происходящие в нем преобразования освещенностей в действующие или эффективные. Графически она выражается кривой зависимости коэффициента T передачи контраста в фотографическом изображении (отношение контраста решетки в изображении к контрасту самой решетки как объекта съемки) от пространственной частоты решетки ν (в лин/мм):

$$T(\nu) = \left(\frac{H_{макс} - H_{мин}}{H_{макс} + H_{мин}}\right)_{изобр} \Big/ \left(\frac{H_{макс} - H_{мин}}{H_{макс} + H_{мин}}\right)_{объект}, \quad (4.4)$$

где $H_{макс}$ и $H_{мин}$ обозначают соответственно максимальные и минимальные освещенности снимаемого объекта и его изображения.

При определении ЧКХ фотоматериалов вместо синусоидальной миры обычно используется штриховая мира (со штрихами различной ширины), подобная применяемым в резольвометрических испытаниях. Удобства измерений ЧКХ заключаются в том, что они позволяют не только определять различные уровни передачи контраста снимаемых мелких деталей в их изображениях, но и оценивать таким путем различные сложные фотографические, кинематографические, телевизионные и другие процессы на их различных звеньях, а также проводить их математическую обработку.

В определениях ЧКХ голографических фотоматериалов вместо указанного выше коэффициента T передачи контраста в фотографическом изображении часто принимается видность V или, иначе, контраст интерференцион-

ных полос. При этом вместо указанной выше штриховой миры различные пространственные частоты регистрируются методами голографической резольвометрии. ЧКХ некоторых голографических фотоматериалов приведены выше на рис. 2.1. Они определялись и для других материалов, сопоставлялись с дифракционной эффективностью, по ним изучалось влияние эффектов проявления на получаемые результаты и др.

Фотометрический эквивалент, кроющая способность и другие характеристики. Существенной характеристикой структурных свойств проявленного серебра является его фотометрический эквивалент, представляющий собой то количество серебра в изображении, которое необходимо для создания его оптической плотности, равной единице. С уменьшением зернистости проявленного изображения фотометрический эквивалент уменьшается. Отсюда голографическое изображение, для которого используются особомелкозернистые высокодисперсные фотоматериалы, характеризуется небольшими величинами фотометрического эквивалента. Величина, обратная фотометрическому эквиваленту, называется кроющей способностью фотоматериала. Для оценки структурных свойств изображения применяются и другие характеристики. К ним относятся и различные так называемые передаточные функции. В теории информации используется понятие энтропии, представляющей собой сумму вероятностей проявления в данной точке изображения определенной оптической плотности, помноженной на отрицательный десятичный логарифм этой вероятности. Эта величина характеризует объем получаемой информации и выражается в так называемых двоичных единицах или битах.

Для характеристики структурных свойств проявленного изображения большой интерес представляют его микрофотографическое и электронно-микрофотографическое исследования. Интересные результаты микрофотографического исследования процесса проявления фотоматериалов ЛОИ-1 и ЛОИ-2 получены Усановым [186], а фотоматериалов ПЭ-1-633 — Кирилловым, Васильевой, Сенченковым и Фельдшеровым [54].

4.4. Химико-аналитические, физико-химические и физико-механические испытания

Для характеристики свойств различных голографических фотоматериалов представляет интерес содержание в них серебра, различных галогенидов серебра, желатины, степени задубленности эмульсионного слоя, его толщины и др. Для таких определений применяются различные методики [219—222], которые в общем виде рассматриваются ниже.

Химико-аналитические определения. Серебро в фотоматериалах содержится в виде его нерастворимых солей, в основном в виде бромистого с небольшим содержанием йодистого серебра. Поэтому для определения серебра эти нерастворимые его соли обычно переводятся в раствор путем фиксирования (отмеренного количества фотоматериала) обычно в растворе тиосульфата. В полученном фиксирующем растворе вместе с промывными водами серебро может быть определено количественно различными методами, в частности в виде осажденного сернистого серебра растворением последнего (после отфильтрования и промывки) в азотной кислоте и затем титрованием роданистым аммонием по Фольгарду. Более просто и быстро полученный после фиксирования раствор серебра можно оттитровать потенциометрически титрованным раствором сернистого натрия. Вследствие недостаточной стабильности растворов сернистого натрия надо проверять их титр каждый раз перед употреблением. Можно также проводить потенциометрические титрования тиомочевиной. Подобные же определения можно проводить нефелометрически или фотоколориметрически (по плотности образующегося коллоидного раствора сернистого серебра). Описаны методы с непосредственным восстановлением галогенидов серебра фотослоя, например, энергичными проявителями с последующим растворением серебра и его титрованием различными методами. Может также проводиться непосредственное титрование тиомочевиной снятого с подложки эмульсионного слоя. В случае особовысокодисперсных фотоматериалов, например «прозрачных», наряду с тиомочевиной титрование может проводиться сернистым натрием.

Для количественного определения различных галогенидов серебра эмульсионный слой (после снятия его с

подложки) может подвергаться потенциометрическому титрованию цианистым калием. Однако вследствие сильной ядовитости цианистого калия данный метод не может рекомендоваться для практического применения. Различные галогениды серебра могут быть определены путем потенциометрического титрования раствора после фиксирования фотоматериала в растворе тиосульфата и затем последующего окисления тиосульфата йодом или марганцевокислым калием. Содержание различных галогенидов определяется по получаемым скачкам потенциала (вначале для йодидов, затем бромидов и далее хлоридов).

Содержание желатины в эмульсионном слое определяется по разности его общего веса и веса определенных предварительно различных галогенидов серебра. Можно также определять содержание желатины по весу эмульсионного слоя после его фиксирования (в растворе тиосульфата натрия), последующей промывки и сушки.

Описаны разные сложные методики определения в эмульсионных слоях незначительных количеств сенсибилизирующих красителей, стабилизаторов и др., на которых здесь останавливаться не представляется возможным.

Физико-химические и физико-механические определения. В готовых фотоматериалах обычно определяется степень задубленности эмульсионного слоя, его прочность при обработке и толщина. В процессе изготовления фотоматериалов проводятся также многие другие физико-химические и физико-механические испытания (определение *p*H, *p*Br, *p*Ag эмульсий, электропроводности промывной воды, прочности держания эмульсионного слоя на подложке и др.).

С т е п е н ь з а д у б л е н н о с т и эмульсионных слоев определяется по температуре их плавления (сползания) с подложки в лабораторном приборе. Прибор состоит из широкогорлой конической колбы на 200—300 мл, в которую через отверстие в корковой пробке вставляется термометр и на дно наливается вода. Для испытания на полоску испытуемого фотоматериала простым карандашом со стороны эмульсионного слоя наносится сетка со стороной квадратиков примерно 3—4 мм. После этого полоска фотоматериала через щель в пробке вставляется в колбу и закрепляется в ней у горловины таким образом, чтобы шарик термометра находился на уровне сетки. Затем колба нагревается с таким расчетом, чтобы температура воздуха в колбе поднималась на 2—3 град/мин. Та температура, при которой будет наблюдаться плавление желатинового слоя (линии сетки на уровне шарика термометра начинают деформироваться), является искомой температурой плавления слоя.

От степени задубленности эмульсионного слоя голографического фотоматериала зависит его усадка при обработке. Можно полагать, при большей задубленности эмульсионного слоя его усадка после обработки будет меньше.

П р о ч н о с т ь э м у л ь с и о н н о г о с л о я определяется по его стойкости к механическим воздействиям при обработке. Это испытание в известной мере дополняет определение температуры плавления и характеризует эмульсионный слой в набухшем состоянии, когда он становится существенно менее прочным, чем в сухом состоянии. Определение прочности эмульсионного слоя проводится по методике, разработанной Дерстугановым [222], для чего исследуемый фотоматериал подвергается обработке, применяемой в контрольных испытаниях или при его практическом использовании. Определения могут также проводиться и на разных стадиях обработки фотоматериала. После обработки прочность эмульсионного слоя измеряется на лабораторной установке, в которой изогнутый стеклянный стержень одним концом (оплавленным до ровной полусферы) опирается на испытуемый эмульсионный слой. При испытании нагрузка на вращающийся стержень постепенно увеличивается. В результате роста давления в некоторый момент слой продавится концом стержня до подложки. Получаемая при этом нагрузка на слой (в граммах) служит мерой его прочности.

Т о л щ и н а э м у л ь с и о н н о г о с л о я голографических фотоматериалов измеряется обычным образом с помощью оптических приборов (оптиметров). Приближенные данные о толщине эмульсионных слоев можно получить и при измерении обычными микрометрами. Как и в случае определения степени задубленности, интересующие экспериментальные исследования влияния разнотолщинности эмульсионных слоев на качество голографического изображения пока не проводились, и в этом отношении можно руководствоваться лишь общими соображениями. Некоторые данные о влиянии толщины эмульсионного слоя на дифракционную эффективность голограмм были рассмотрены выше.

4.5. Голографические характеристики

Наиболее правильная оценка свойств фотоматериалов может быть проведена в тех условиях, для которых они предназначены. Это в особенности относится к голографическим фотоматериалам, принимая во внимание специфические условия формирования голографических изображений, представляющих собой дифракционные решетки разной пространственной частоты. Если не учитывать кривую амплитудного пропускания, то остальные голографические характеристики фотоматериалов служат, по-существу, известным дополнением для оценки их структурных свойств, получаемых в тех же условиях, в которых они применяются.

Ермолаевым и Михайловой [223] разработана специальная установка для исследования свойств голографических фотоматериалов. На этой установке проводится экспонирование исследуемых фотоматериалов с помощью лазеров, в результате чего могут определяться: 1) энергетическая светочувствительность, 2) характеристические кривые или кривые амплитудного пропускания ($\tau = f(H)$), 3) дифракционная эффективность пропускающих и отражательных голограмм и их зависимости от амплитудного пропускания и пространственной частоты, 4) отношение полезного сигнала к шуму в восстанавливаемом изображении и др.

В связи с необходимостью получения достаточной точности проводимых измерений к жесткости установки были предъявлены повышенные требования. На ней может осуществляться в разных вариантах двухлучевая схема голографирования с изменением пространственной частоты регистрируемой интерференционной структуры от 200 до 2100 лин/мм. На установке также возможно проводить голографирование во встречных пучках и определять дифракционную эффективность получаемых голограмм.

Определение голографических характеристик различных фотоматериалов может проводиться и на других установках.

Кривая амплитудного пропускания. В отличие от фотографии в голографии удобнее характеризовать проявленный фотографический слой (голограмму) не в виде характеристической кривой, а в виде зависимости амплитудного

пропускания от экспозиции (или логарифма экспозиции). Эти кривые могут быть вычислены из характеристических кривых фотоматериала или определены в непосредственных испытаниях. Кривые амплитудного пропускания высокоразрешающих фотопластинок Микрат-ВРЛ при разной продолжительности проявления были приведены на рис. 2.7. На рис. 4.3 показаны кривые амплитудного пропускания голографических фотоматериалов Агфа-Геверт 8E75, 10E75 и 14C75 (длина волны излучения $\lambda = 633$ нм) [63].

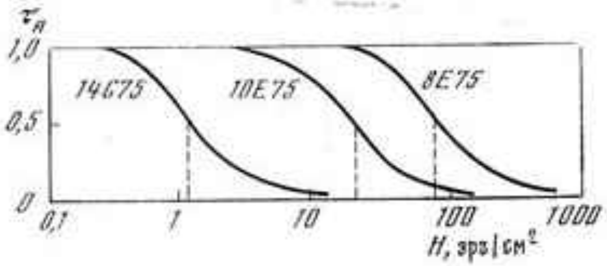


Рис. 4.3. Кривые амплитудного пропускания τ_A голографических фотоматериалов Агфа-Геверт [63]

Голографическая светочувствительность и обобщенные экспозиционные характеристики. Как уже отмечалось, в отличие от понятия фотографической светочувствительности голографическая светочувствительность фотоматериалов связана с их дифракционной эффективностью, экспозицией и видностью (контрастом) интерференционных полос.

Метод оценки свойств фотоматериалов по их голографической светочувствительности разработан Лином [4, 43]. Согласно этому методу строятся так называемые экспозиционные характеристики фотоматериалов, представляющие зависимость дифракционной эффективности фотоматериала (точнее, корня квадратного из величины дифракционной эффективности) от видности интерференционных полос или экспозиции, которые определяются исходя из выражения для голографической светочувствительности. Для идеальных фотоматериалов эти зависимости выражаются прямыми линиями, для реальных же фотоматериалов — кривыми. Эти характеристики позволяют получить информацию об испытуемом фотоматериале,

включающую в себя диапазон изменения контраста (видности) интерференционных полос, максимальное значение дифракционной эффективности, которое может быть получено при данных условиях, величину экспозиции при заданном контрасте интерференционных полос, а также оптимальное значение средней дифракционной эффективности.

Несмотря на достаточную полноту получаемой информации о голографических свойствах фотоматериала, такая его характеристика все же является сложной и трудоемкой.

Чтобы учесть потери исходного лазерного света при голографировании и связать эффективную светочувствительность фотоматериалов с дифракционной эффективностью, как уже отмечалось, Бидерман [72] предложил определять их так называемый экспозиционный индекс, представляющий собой отношение фотографической светочувствительности к фактору потерь. В практическом отношении фактическую светочувствительность фотоматериала проще можно характеризовать по его экспозиции в конкретных (типовых) условиях голографирования при достижении оптимальной дифракционной эффективности.

Разрешающая способность и ЧКХ, определяемые интерференционными методами, могут служить голографическими характеристиками фотоматериалов. Андреев и Прусс [224] отмечают связь между ЧКХ и дифракционной эффективностью фотоматериалов и приводят некоторые исходные данные для их определения. Зависимость максимальной дифракционной эффективности от пространственной частоты предлагается называть частотно-дифракционной характеристикой (ЧДХ).

Некоторые интерференционные методы определения разрешающей способности и ЧКХ были рассмотрены нами выше.

Дифракционная эффективность является одной из наиболее важных характеристик изображений, восстанавливаемых при освещении голограмм, и служит мерой их яркости. Дифракционная эффективность пропускающих голограмм определяется по отношению интенсивности света, дифрагированного в первый порядок, ко всему свету, падающему на голограмму, и выражается в относительных единицах или в процентах к интенсивности падающего

света. Для определения дифракционной эффективности обычно регистрируется голограмма интерференционной структуры, образующейся от двух симметрично расположенных лазерных пучков света. После обработки полученная голограмма устанавливается под тем же углом, у того же источника света, который использовался при записи. Интенсивность восстановленного пучка света измеряется (например, с помощью умножителя), и по отношению ее к интенсивности падающего света вычисляется дифракционная эффективность для данной пространственной частоты голограммы.

Согласно исследованию Нассенштейна, Дедена, Метца и др. [63] дифракционная эффективность пропускающих голограмм уменьшается с увеличением частоты регистрируемой голограммы и достигает оптимального значения при некоторой оптимальной экспозиции (рис. 4.4) при амплитудном пропускании, равном 0,5, что соответствует оптической плотности голограммы ~0,6.

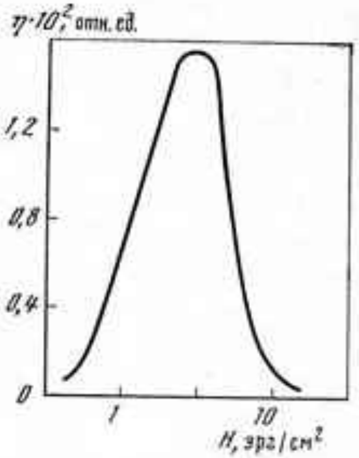


Рис. 4.4. Зависимость дифракционной эффективности пропускающих голограмм от экспозиции [63]

Гапоненко и Андреев [225] разработали методику определения дифракционной эффективности с изменением плотности записываемой голограммы путем обычного расширения лазерного луча в одном направлении. Полученная после обработки голограмма измеряется на специальном считывающем столике с самописцем, и за результат принимается оптимальное значение для данной пространственной частоты.

Следует, однако, отметить, что поскольку экспозиционная светочувствительность определяется при максимальной дифракционной эффективности фотоматериала, то ее измерения целесообразнее проводить при известном, а не приближенном освещении.

Дифракционная эффективность отражательных голограмм, получаемых во встречных пучках, определяется

отношением интенсивности отраженного от голограмм света к интенсивности всего света данной длины волны, падающего на голограмму при ее восстановлении. Для ее определения распространение получила методика, разработанная Денисюком, Сухановым и Андреевой [226], в которой проводится голографирование плоского зеркала с последующим измерением спектрального коэффициента отражения полученной голограммы с помощью специальной приставки к спектрографу. На получаемые результаты существенное влияние оказывает усадка эмульсионного слоя после обработки [193], что следует учитывать в проводимых определениях и соответственно устранять при измерениях.

Разными авторами применяются различные условия осуществления указанных выше определений дифракционной эффективности различных фотоматериалов. Надо иметь в виду, что вследствие тонкости проводимых определений небольшие изменения в них могут приводить к существенно различным результатам. Особенно необходимо обращать внимание на амортизацию и жесткость используемой установки для голографирования, обработку получаемых голограмм и устранение усадки эмульсионного слоя после обработки.

Шумы зависят от условий экспонирования голограмм и связываются с так называемой диффузной пятнистостью когерентного пучка лазерного света при его интерференции в эмульсионном слое в результате рассеяния света, зависящего от используемого материала [224]. Оценку спектра шума целесообразно проводить по равномерно засвеченному фотоматериалу с амплитудным пропусканием (после проявления), равным примерно 0,5, когда наблюдается максимум шума. Исследование рассеяния света спектра голографических материалов при экспонировании излучениями лазера и лампами накаливания проведено Бидерманом [227].

Усадка эмульсионного слоя, ориентационная чувствительность. В отличие от усадки фотоматериалов в фотографии и кинематографии в голографии под усадкой эмульсионного слоя после обработки понимается уменьшение его толщины. При голографировании во встречных пучках и восстановлении голограмм белым светом это приводит к смещению цвета изображения из длинноволновой в более коротковолновую часть спектра, а также к уменьшению

дифракционной эффективности [193]. В количественном отношении после обработки толщина эмульсионного слоя может уменьшаться на 10—20%. Меньшая усадка эмульсионного слоя некоторых фотоматериалов может связываться с более сильным задубливанием и меньшим содержанием в них серебра. Измерения таких небольших изменений в толщине эмульсионного слоя (до 1 мкм и меньше) обычным образом затруднительны, поэтому их проводят по наблюдению изменения цвета (длина волны) зарегистрированного излучения с помощью спектрографа и затем пересчитывают полученные результаты в изменении толщины слоя.

Применяемое понятие ориентационной чувствительности не имеет отношения ни к фотографической, ни к голографической светочувствительности и характеризует возможность записи на фотоматериале ряда изображений под разными углами [65], которая увеличивается с увеличением толщины эмульсионного слоя. Указывается [228], что при записи двух изображений дифракционная эффективность составляет 51,6%, а четырех изображений 21,1% от исходной дифракционной эффективности при записи одного изображения.

Для оценки голографических свойств высокоразрешающих фотоматериалов практический интерес представляют разработанные Гириной и Соболевым [229] методики, основанные на измерении фотолитически образующегося серебра непосредственно в процессе записи пропускающих голограмм без необходимости какой-либо мокрой обработки фотоматериала. Сущность данных методик заключается в том, что в процессе записи голограмм сразу же с помощью тех же исходных лучей производится измерение (например, с помощью фотоумножителя) получаемого эффекта (рис. 4.5) [230]. С помощью данной методики проведена сравнительная оценка информационной емкости, дифракционной эффективности, шумов и т. п. разных фотоматериалов. Методика наиболее пригодна для оценки свойств особовысокодисперсных «прозрачных» фотоматериалов.

Броуном и др. [231] проведены сравнительные исследования свойств липпмановских и «прозрачных» фотоматериалов ПЭ-1-633 путем непосредственного измерения на них скрытого фотографического и голографического изображения (фотолитического серебра) с помощью методики

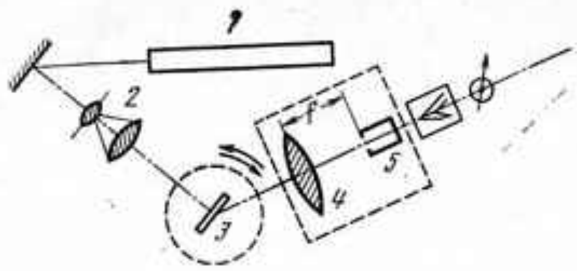


Рис. 4.5. Схема записи и воспроизведения скрытого голографического изображения на высокоразрешающих галогенидосеребряных фотоматериалах [230]

1 — лазер; *2* — коллиматор; *3* — голограмма; *4* — линза; *5* — фотоприемник

фотометрирования слабопоглощающих сред. При этом в полученных кривых фотолиза галогенидов серебра не наблюдается принципиальной разницы при экспонировании обычным (белым) светом в сенситометре и с помощью лазера для получения голографического изображения в сходящихся пучках. Интересно отметить, что наблюдаемая в этой работе некоторая пороговая светочувствительность исследованных фотоматериалов при ее измерении по скрытому изображению оказывается значительно больше, чем при обычном определении по проявленному изображению.

Представляется, что после дополнительных исследований и разработок рассмотренные методики измерения скрытого голографического изображения смогут найти применение как для контроля свойств фотоматериалов, так и для получения голограмм в реальном масштабе времени без применения какой-либо обработки материала после экспонирования.

4.6. Контроль процесса обработки голографических фотоматериалов

Кроме указанной ранее необходимости разработки требуемого современного автоматизированного проявочного (обрабатывающего) оборудования для обработки голографических фотоматериалов, одновременно встает вопрос и о разработке необходимых методов контроля технологического процесса и поддержания его стабильности. Понятно, что какого-либо практического опыта в этой области пока не имеется. Однако уже пора начинать проведение соответствующих разработок, для чего в некоторой мере можно использовать имеющийся опыт контроля процессов обработки различных кинофотоматериалов [179, 219, 221, 232 и др.].

Прежде всего необходимо контролировать состав и фотографические (голографические) свойства проявляющих, фиксирующих и других обрабатывающих растворов при их приготовлении и использовании в проявочных устройствах. Необходим также соответствующий контроль режимов обработки фотоматериалов (температуры растворов и промывной воды, продолжительности отдельных стадий процесса, сушки и др.). В современном оборудовании для этого применяется соответствующее программное управление процессом и автоматизация его отдельных стадий. Кроме различных химико-аналитических методов контроля растворов, применяются также различные физико-химические и физико-механические методы, в том числе и контроль состояния (прочности) эмульсионного слоя на разных стадиях обработки материала.

Важное значение приобретает разработка требуемых контрольных испытаний используемых высокоразрешающих фотоматериалов и получаемых голограмм. Последнее прежде всего связывается с обеспечением их сохраняемости, для чего должна контролироваться степень промывки от используемых растворов [221], состояние эмульсионного слоя и нанесения на него защитных покрытий.

Специфика голографического процесса показывает, что для контроля процесса обработки голографических фотоматериалов потребуется постановка соответствующих обстоятельных исследований и разработка необходимых методов контроля, в том числе и голографических. При этом особое внимание должно быть обращено на разработку требуемых контрольно-измерительных приборов и осуществление автоматизации контроля на разных стадиях технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Строук Дж.* Введение в когерентную оптику и голографию. М.: Мир, 1967.
2. *Островский Ю. И.* Голография и ее применение. Л.: Наука, 1973.
3. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
4. Holographic Recordings Materials / Ed. H. M. Smith. Berlin Heidelberg; New York: Springer — Verlag, 1977.
5. *Gabor D.*— Nature, 1948, **161**, p. 777—778.
6. *Gabor D.*— Proc. Roy. Soc., 1949, **A197**, p. 457—487.
7. *Gabor D.*— Proc. Phys. Soc., 1951, **B64**, p. 449—469.
8. *Valenta E.* Die Photographie in natürlichen Farben. 2. Aufl. Halle, 1912.
9. *Дидебулидзе А. И.* Цветная фотография на солях серебра. Кукарка, 1915.
10. *Lippman G.*— Compt. rend. Acad. sci., 1891, **112**, p. 274—275.
11. *Денисюк Ю. Н.*— ДАН СССР, 1962, **144**, № 6, с. 1275—1278.
12. *Денисюк Ю. Н.*— Опт. и спектр., 1963, **15**, с. 552; 1965, **18**, с. 276.
13. *Денисюк Ю. Н.*— ЖНиПФиК, 1966, **11**, № 1, с. 46—56.
14. *Leith E., Upatnieks U.*— J. Opt. Soc. Amer., 1961, **51**, p. 1469.
15. *Leith E., Upatnieks U.*— J. Opt. Soc. Amer., 1962, **52**, p. 1123.
16. *Leith E., Upatnieks U.*— J. Opt. Soc. Amer., 1963, **53**, p. 1295.
17. *Кириллов Н. И., Соболев Г. А.*— Матер. III Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972, с. 13—28.
18. *Майкельсон А. А.* Исследования по оптике. М.; Л.: Госиздат, 1922.
19. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики: Пер. с англ./ Под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1970.
20. *Кириллов Н. И., Любимов Е. М.*— Тезисы докл. семинара «Голография и ее применение». Л.: ЛДНТП, 1974, с. 134—137.
21. *Кириллов Н. И., Любимов Е. М.*— Техн. кино и телевидения, 1976, № 4, с. 19—22; Квант. электроника, 1976, 3, № 11, с. 2519—2521.
22. *Lehman H.* Betrage zur Theory und Praxis der direkten Pharbenphotographiemittels stehender Zichtwelle nach Lippmanns Metoden. Freiburg, 1904.
23. *Zenker W.* Lehrbuch der Photographie. Berlin, 1868.
24. *Барачевский В. А., Лашков Г. И., Цехомский В. А.* Фотохромизм и его применение. М.: Наука, 1977.

25. Современные системы записи и воспроизведения изображений / Сост. В. И. Ушагина. М.: Искусство, 1972.
26. *Гущо Ю. П.* Рельефография. М.: Мир, 1974.
27. *Барачевский В. А., Козенков В. М.* Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 26—41.
28. *Барачевский В. А., Козенков В. М.*— Труды НИКФИ, 1972, вып. 65, с. 1972.
29. *Urbach J.*— Proc. Develop. Hologr. SPIE Seminar Proc., 1971, **25**, p. 17—42.
30. *Синцов В. Н.*— Матер. II Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1971; Матер. III Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972, с. 386—396.
31. *Biedermann K.*— Opt. acta, 1975, **22**, N 2, p. 113—124. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1975, № 21, с. 2—13).
32. *Шеберстов В. И.*— В кн.: Успехи научной фотографии. Л.: Наука, т. XVIII, 1977, с. 18—25.
33. *Протас И. Р.*— ЖНиПФиК, 1969, **14**, № 3, с. 209—211.
34. *Протас И. Р.*— Матер. I Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1971, с. 502—514.
35. *Протас И. Р.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 76—79.
36. *Синцов В. Н.*— ЖНиПФиК, 1970, **15**, № 5, с. 379—386.
37. *Кириллов Н. И.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 5—25.
38. *Ванин В. А., Вагин Л. Н., Королев В. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 69—79.
39. *Серов О. Б., Соболев Г. А., Чурсин В. Н.*— Труды НИКФИ, 1975, вып. 78, с. 193—198.
40. *Kogelnik H.*— Proc. Symp. Mod. Opt./ Ed. J. Fox. New York, 1967, p. 605.
41. *Kogelnik H.*— Bell. Syst. Techn. J., 1969, **48**, p. 2909.
42. *Belder M. de.*— Photogr. Sci. and Eng., 1969, **13**, N. 6, p. 351—360. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1971, № 15, с. 1—19).
43. *Lin L. H.*— J. Opt. Soc. Amer., 1971, **61**, N 2, p. 203—208. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1971, № 15, с. 1—19).
44. *Gara A. B., Ju F. F.*— Appl. Opt., 1971, **10**, N 6, p. 1324—1328. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1971, № 35, с. 6—16.)
45. *Суханов В. И.*— Автореф. канд. дис. Л., 1971. В надзаг.: ГОИ.
46. *Барбанель И. С., Крупицкий Э. И.*— ЖНиПФиК, 1972, **17**, № 4, с. 276—281.
47. *Миз К.* Теория фотографического процесса / Под ред. Ю. Н. Гороховского. М.; Л.: Гостехиздат, 1949.
48. *Миз К., Джеймс Н.* Теория фотографического процесса. М.: Наука, 1973.
49. *Денисюк Ю. Н., Протас И. Р.*— Опт. и спектр., 1963, **14**, № 5, с. 721—725.
50. *Рябова Р. В., Самойлович Д. М., Сенченков Е. И., Чендов Ю. С.*— ЖНиПФиК, 1967, **12**, № 3, с. 217—218.
51. *Быковский Ю. А., Ларкин А. И., Самойлович Д. М.* и др.— ДАН СССР, 1969, **185**, № 3, с. 552—554.

52. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В., Фельдшеров Е. М.*— Междунар. конгресс по фотографич. науке (Москва, 1970). М.: Внешторгиздат, 1970, секция В, с. 317—320.
53. *Васильева Н. В., Кириллов Н. И.*— Матер. II Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1971, с. 299—305.
54. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В., Сенченков Е. П., Фельдшеров Е. М.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 54—59.
55. *Junge K.*— Bild und Ton, 1971, **1**, S. 27—31.
56. *Гафурова Н. С., Борин А. В., Просалова Н. А.*— Матер. IV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 350—358.
57. *Богомолов К. С., Груз Э. А., Вахтанова Л. П.* и др.— ЖНиПФиК, 1972, **17**, № 2, с. 141—143.
58. *Васильева Н. В., Кириллов Н. И.*— Техн. кино и телевидения, 1972, № 7, с. 3—8.
59. *Васильева Н. В., Кириллов Н. И.*— Матер. III Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972, с. 339—354.
60. *Ермолаев М. М., Кракау Ю. А., Протас И. Р.* и др.— Междунар. конгресс по фотографич. науке (Дрезден, 1974): Тезисы докл. Секция 2(44), с. 143—144.
61. *Ермолаев М. М., Кракау Ю. А., Протас И. Р.* и др.— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 41—44.
62. *Протас И. Р., Михайлова В. И., Михайлова Е. Н.* и др.— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 40—42.
63. *Nassenstein H., Deden H., Metz H.* et al.— Phot. Sci. and Eng., 1969, **13**, N 4, p. 194—199. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1969, № 47, с. 1—15.)
64. *Бобренев В. И., Потапова Н. В., Решетникова Г. И.*— ЖНиПФиК, 1969, **14**, № 3, с. 376—378.
65. *Соболев Г. А., Макеев В. А.*— Междунар. конгресс по фотографич. науке (Москва, 1970): Тезисы докл. М.: Внешторгиздат, 1970, секция Д, с. 215—219.
66. *Bushmann H. T.*— Phot. Sci. and Eng., 1972, **16**, № 6, p. 425—429. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. Фотогр., 1973, № 20, с. 1—14.)
67. *Толчин В. Г., Турухано Б. Г., Турухано Н.* и др.— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. I, с. 107—110.
68. *Толчин В. Г., Турухано Б. Г., Турухано Н.* и др.— Матер. V Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 345—356.
69. *Прусс П. Х., Мацкевич Д. В.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 138—141.
70. *Прусс П. Х., Мацкевич Д. В.*— ЖНиПФиК, 1976, **21**, № 6, с. 454—456.
71. *Протас И. Р., Кракау А. М., Михайлов В. И., Сидоренкова П. Т.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 76—79.
72. *Biedermann K.*— Phot. Sci. and Eng., 1969, **13**, N 6, p. 361—370; Appl. Opt., 1971, **10**, N 3, p. 584—585. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1970, № 13, с. 1—17; 1971, № 25, с. 10—31.)

73. *Суханов В. И., Андреева О. В.*— Опт.-мех. пром-сть, 1972, № 3, с. 63—64.
74. *Андреева О. В., Суханов В. И.*— Опт. и спектр., 1971, **30**, № 4, с. 386—387.
75. *Стаселько Д. И., Смирнов А. Г.*— ЖНиПФиК, 1970, **15**, № 1, с. 66—68.
76. *Какичашвили Ш. Д., Гафурова Н. С., Борин А. В.*— ЖНиПФиК, 1970, **15**, № 2, с. 153—155.
77. *Усанов Ю. Е., Ермолаев М. М.*— Опт.-мех. пром-сть, 1972, № 12, с. 39—41.
78. *Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Фельдшеров Е. М.* и др.— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 37—39.
79. *Стаселько Д. И., Образцов В. С.*— ЖНиПФиК, 1972, **17**, № 2, с. 115—121.
80. *Зеликман В. Л., Подгородецкий Е. К., Цветков Г. М.* и др.— В кн.: Технология изготовления светочувствительных материалов / Под ред. В. И. Шеберстова. М.: Химия, 1978.
81. *Lin H., Lo-Bianco C.*— Appl. Opt., 1967, **6**, N 7, p. 1225—1258.
82. *Андреева О. В., Ярославская Н. Н., Говорков Л. П.* и др.— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 155—160.
83. *Андреева О. В., Загорская З. А., Кадыш Т. И.* и др.— В кн.: Оптическая голография. (Матер. к краткосрочному семинару). Л.: ЛДНТП, 1972, с. 27—30.
84. *Smith H.*— J. Opt. Soc. Amer., 1972, **62**, N 6, p. 802—806.
85. *Kieml H.*— Opt. Technol., 1969, **1**, N 4, p. 203—207.
86. *Кириллов Е. А.*— Журн. рус. физ.-хим. о-ва. Физич. отд-ние, 1911, вып. 8, с. 405—422.
87. *Кириллов Н. И.*— Техн. кино и телевидения, 1977, № 2, с. 20—22.
88. Кодак-Пате. Спецификация фотоматериалов, поставляемых по специальным заказам. 1971, с. 14.VI.
89. *Ragnarson S.*— Opt. Communs, 1975, **14**, N 1, p. 39—41.
90. *Ragnarson S.*— Rev. Sci. Instr., 1975, **46**, N 9, p. 1302—1303.
91. *Богомолов К. С., Вахтанова Л. П., Груз Э. А.*— ЖНиПФиК, 1975, **20**, № 5, с. 344—348.
92. *Богомолов К. С., Вахтанова Л. П., Груз Э. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 44—48.
93. *Гратюк Л. Н., Гурач М. Л., Марченко С. Н., Рябова Р. В.*— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 35—36.
94. *Кострюков В. В., Романов Б. П., Рябова Р. В.* и др.— ЖНиПФиК, 1975, **20**, № 1, с. 38—39.
96. *Быковский Ю. А., Елхов Е. А., Ларкин А. И.* и др.— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 45.
96. Brit. J. Photogr., 1970, N 5740, p. 721.
97. *Макеев В. А.*— Матер. IV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 323—328.
98. *Ванин В. А., Вагин Л. Н., Королев В. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 69—79.
99. *Серов О. Б., Соболев Г. А., Чуркин В. Н.*— Труды НИКФИ, 1975, вып. 78, с. 193—198.

100. *Соболев Г. А., Чурсин В. Н., Серов О. Б.*— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 1, с. 38—39.
101. *Зайцева В. П., Толчин В. Г., Турухано Б. Г.*— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 1, с. 37—38.
102. *Соболев Г. А., Чурсин В. Н., Селецкая Т. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 80—85.
103. *Земцова Э. Г., Ляховская Л. В.*— Опт.-мех. пром-сть, 1974, № 8, с. 75—76.
104. *Земцова Э. Г., Ляховская Л. В.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 66—68.
105. *Толчин В. Г., Турухано Б. Г.*— Матер. IV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 345—356.
106. *Masari N.*— Appl. Opt., 1973, 12, N 3, p. 496—499. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1973, № 22, с. 1—8).
107. *Комар В. Г., Овечкис Ю. Н.*— Техн. кино и телевидения, 1976, № 9, с. 18—22.
108. *Кикичашвили Ш. Д., Чиквадзе Д. В., Джугели Б. П.*— Техн. кино и телевидения, 1972, № 4, с. 7—11.
109. *Ванин В. А., Назарова Л. Г.*— ЖНиПФиК, 1972, 17, № 4, с. 304.
110. *Пекарь Л. С.*— Матер. IV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 305—310.
111. *Phillips N. J., Porster D.*— J. Phys. E. Sci. Instrum., 1976, 9, N 8, p. 631—634.
112. *Benton S.*— Opt. Eng., 1975, 14, N 5, p. 402—407.
113. *Налимов И. П.*— Техн. кино и телевидения, 1977, № 3, с. 90—92.
114. *Зеликман В. Л., Леви С. М.* Основы синтеза и полива фотографических эмульсий. М.: Искусство, 1960.
115. *Уолл Э.* Фотографические эмульсии / Пер. с англ. В. К. Васильева; Под ред. А. И. Рабиновича. Л.: ГОНТИ, 1931.
116. *Luppo-Cramer H.*— In: Eder J. M. Ausfurhliches Handbuch der Photographie. Halle, 1927, Bd. II, Tl. 1, S. 7.
117. *Ives H. E.*— Z. wiss. Photogr., 1908, 6, N 11, S. 373—406.
118. *Ives H. E.*— Astrophys. J., 1908, 27, p. 325.
119. *Jahr R.*— Photogr. Ind., 1925, 23, p. 1010.
120. *Жданов А. П.*— Труды Радиевого ин-та, 1937, 3, с. 7.
121. *Новикова Н. Р.*— Усп. науч. фотографии, 1966, 11, с. 135—160.
122. *Кириллов Е. А.*— Тонкая структура в спектре поглощения фотохимически окрашенного галоидного серебра. М.: Изд-во АН СССР, 1954.
123. *Чибисов К. В.* Химия фотографических эмульсий. М.: Наука, 1975.
124. *Загорская З. А.*— Опт. и спектр., 1973, № 2, с. 72.
125. *Demers P.*— Canad. Journ. Phys., 1954, 8, p. 538.
126. *Перфилов Н. А., Прокофьева Е. Н., Новикова Н. Р.* и др.— ЖНиПФиК, 1960, 5, № 4, с. 262—272.
127. *Новикова Н. В., Захаров В. И.*— ЖНиПФиК, 1961, 6, № 4, с. 347—350.
128. *Зеликман В. Л.*— ЖНиПФиК, 1967, 12, № 5, с. 379—395.
129. *Оливер А., Ахмад Н.* Ядерная фотография / Под ред. К. С. Богомолова, Н. А. Перфилова. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
130. *Zizic B., Vucovic J.*— In: Korpuskularphotographie. München, 1963, IV, S. 231—241.

131. *Marcocki W., Romar W.*— In: Korpuskularphotographie. München, 1963, IV, S. 149—162.
132. *Marcocki W.*— In: Korpuskularphotographie. München, 1963, IV, S. 162—168.
133. *Klein E., Moiser E.*— In: Korpuskularphotographie. München, 1963, IV, S. 132—140.
134. Однородные фотографические эмульсии / Под ред. С. А. Бреслава. М.: НИИТХИМ. Т. I, II, 1971; Т. III, 1972.
135. *Гаева З. А., Говорков Л. П., Ляликов К. С.* и др.— Труды ЛИКИ, 1968, вып. 13, с. 209—222.
136. *Ляликов К. С., Ярославская Н. Н., Говорков Д. П.*— Усп. науч. фотографии, 1970, 14, с. 97—103.
137. *Говорков Л. П., Ляликов К. С., Ярославская К. Н.*— Труды ЛИКИ, 1970, вып. 16, с. 95—111.
138. *Ярославская Н. Н.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 48—54.
139. *Фаерман Г. П., Гусева Л. К.*— Труды ЛИКИ, 1963, вып. 9, с. 35—50; 1970, вып. 16, с. 102—110.
140. *Протас И. Р., Кракау Ю. А., Михайлова В. И.*— ЖНиПФиК, 1970, 15, № 5, с. 335—339.
141. *Sutherns S.* Istmann Kodak. Пат. США № 3519427, опубл. 7.VII 1970.
142. *Каплун Л. Я., Бреслав Ю. А., Поспелова Н. В.*— В кн.: Труды Госниихимфотопроект, 1975, вып. 19, с. 36—49, 50—54.
143. *Протас И. Р., Михайлова В. И.*— ЖНиПФиК, 1975, 20, № 5, с. 348—353; 1970, 15, № 4, с. 348—353.
144. *Протас И. Р., Михайлова В. И.*— ЖНиПФиК, 1970, 15, № 4, с. 272—275.
145. *Протас И. Р., Кракау Ю. А., Михайлова В. И.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 41—44.
146. *Liesegang R.*— Photogr. Rundschau, 1915, 15, S. 198.
147. *Кракау Ю. А.*— ЖНиПФиК, 1961, 6, № 5, с. 345—348.
148. *Colomer J.*— Sci. et Ind. Photogr., 1960, 31, p. 1.
149. *Кириллов Н. И., Хейнман А. О.*— ЖПХ, 1951, 24, № 10, с. 1019—1025.
150. *Богомолов К. С., Кононенко И. И., Груз Э. А.*— ЖНиПФиК, 1976, 21, № 4, с. 256—261.
151. *Гафурова Н. С., Борин А. В., Петросян Л. М., Победоносцева Н.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 100—104.
152. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В., Зеликман В. Л.*— Усп. науч. фотографии, 1972, 16, с. 204—211.
153. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В., Зеликман В. Л.*— ЖНиПФиК, 1970, 15, № 6, с. 441—443.
154. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В.*— ЖНиПФиК, 1973, 18, № 2, с. 136—138.
155. *Самойлович Д. М., Ардашев Р. В., Рябова О. В.*— Междунар. конгресс по фотографич. науке (Москва, 1970): Тезисы докл. М.: Внешторгиздат, 1970, секция В, с. 329—332.
156. *Загорская З. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 59—61.
157. *Загорская З. А.*— Опт.-мех. пром-сть, 1973, № 2, с. 72.
158. *Новиков Н. А., Валиахматова Р. Г.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 61—66.

159. *Натансон С. В., Климло Э. Ф., Сергеева З. Н.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 105—189.
160. *Haulet A., Renotte C.*— Photogr. Korresp., 1971, N 8, p. 163—168.
161. *Ляликов К. С., Воронкова Н. И.*— ЖНиПФиК, 1962, 7, № 5, с. 333—340.
162. *Ляликов К. С., Говорков Л. П.*— Труды ЛИКИ, 1972, вып. 19, с. 93—98.
163. *Claes F., Berendsen R.*— Photogr. Korresp., 1965, 101, N 3, p. 37—42.
164. *Мейкляр П. В.* Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. М.: Наука, 1972.
165. *Ляликов К. С., Гинзбург К. М., Антипин А. В.*— ЖНиПФиК, 1963, 8, № 2, с. 101.
166. *Протас И. Р., Кракау Ю. А., Михайлова В. И.*— ЖНиПФиК, 1970, 15, № 5, с. 335—338.
167. *Galvin J.*— Photogr. Sci. and Eng., 1970, N 4, p. 258—261.
168. *Ванин В. А., Назарова Л. Г.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. 1, с. 53—57.
169. *Самойлович Д. М., Рябова Р. В.*— ЖНиПФиК, 1968, 13, № 2, с. 109—110.
170. *Борин А. В., Гафурова Н. С., Киселева Р. К.*— Матер. IV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973, с. 350—358.
171. *Рябова Р. В., Самойлович Д. М.*— ЖНиПФиК, 1975, 20, № 2, с. 135—136.
172. *Зеликман В. Л.*— ЖПХ, 1953, 26, с. 353—356.
173. *Лимонова В. В., Матвеева Л. В.*— Труды Одесского ун-та, 1956, 4, с. 167.
174. *Гаева З. А., Говорков Л. Е., Ляликов К. С.* и др.— Труды ЛИКИ, 1968, вып. III, с. 209—222.
175. *Ярославская Н. Н., Андреева О. В., Суханов В. И.*— В кн.: Оптическая голография и ее применение: Матер. к семинару. Л.: ЛДНТП, 1974, с. 111—114.
176. *Ярославская Н. Н., Андреева О. В., Суханов В. И.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 106—110.
177. *Усанов Ю. Е., Кособокова Н. Л.*— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 43—44.
178. *Ларионов Н. П., Лукин А. В., Мустафин К. С.*— ЖНиПФиК, 1974, 19, № 1, с. 32—38.
179. *Кириллов Н. И.* Основы процессов обработки галогенидо-серебряных кинофотоматериалов. М.: Искусство, 1977.
180. *Богомолов К. С., Кононенко И. Н., Романовская К. М.* и др.— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 95—99.
181. *Hariharan P., Ramantan C., Karschik G.*— Appl. Opt., 1973, 12, N 3, p. 61—62.
182. *Smit H., Calari C.*— Photogr. Sci. and Eng., 1970, 15, N 2, p. 130—135. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1975, № 23, с. 11—17.)
183. Brit. J. Photogr., 1970, N 5740, p. 706.
184. *Кириллов Н. И., Масленкова Н. В., Васильева Н. В.* и др.— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 112—116.

185. *Масленкова Н. Г., Петренко А. С., Кириллов Н. И.* и др.— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 2, с. 38—40.
186. *Усанов Ю. Е.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 98—105.
187. *Skillmann D. C.*— Photogr. Sci. and Eng., 1975, 19, N 1, p. 28—37. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1976, № 10, с. 9—18).
188. *Duffi D.*— J. Phys. and Sci. Instrum., 1970, 3, p. 561—562.
189. *Mutter E.* Pharbenphotographie. Theory and Praxis. Vienna; New York, 1967, S. 116.
190. *Петров В. Д.*— ЖНиПФиК, 1976, 21, № 3, с. 214—215.
191. *Усанов Ю. Е., Кособокова Н. Л.*— ЖНиПФиК, 1977, 22, № 6, с. 447—448.
192. *Петров В. Д., Вахтанова Л. П., Богомолов К. С.* и др.— ЖНиПФиК, 1976, 21, № 2, с. 144—145.
193. *Дзюбенко М. И., Пятикоп А. П., Шевченко В. В.*— В кн.: Оптическая голография и ее применение: Матер. к семинару. Л.: ЛДНТП, 1974, с. 120—122.
194. *Богомолов К. С., Вахтанова Л. П., Груз Э. А.*— ЖНиПФиК, 1974, 19, № 1, с. 27—32.
195. *Андреева О. В., Суханов В. И., Вейденбах В. А.* и др.— II Всесоюз. конф. по голографии: Тезисы докл. Киев, 1975, ч. 1, с. 36—37.
196. *Кириллов Н. И., Васильева Н. В.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. I, с. 23—37.
197. *Богомолов К. С., Вахтанова Л. П., Груз Э. А.* и др.— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 117—121.
198. *Burchardt C., Daherti E.*— Appl. Opt., 1969, 8, N 12, p. 1479—1482.
199. *Latta J.*— Appl. Opt., 1968, 7, N 12, p. 2409—2416. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1969, № 8, с. 1—5.)
200. *Hannes H.*— J. Opt. Soc. Amer., 1968, 58, p. 140.
201. *McMahon D., Malany W.*— Appl. Opt., 1970, 2, N 6, p. 1363—1368. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1970, № 44, с. 12—16.)
202. *Pennington K., Harper J.*— Appl. Opt., 1970, 9, N 7, p. 1643—1650. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1970, № 44, с. 12—16.)
203. *Benesse R., Bent T.*— Optik, 1973, 38, N 2, p. 156—158. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1973, № 12, с. 11—17.)
204. *Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко А. С., Гуланян Э. Х.* В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 122—124.
205. *Богомолов К. С., Вахтанова Л. П., Груз Э. А., Петров В. Д.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 44—48.
206. *Pennington K., Harper G., Laming F.*— Appl. Opt. Phys. Letters, 1971, 18, N 3, p. 80—84.
207. *Graube A.*— Appl. Opt., 1974, 12, p. 2942—2946. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1975, № 11, с. 1—6.)

208. *Букатин Е. А.*— ЖНиПФиК, 1965, **10**, № 3, с. 219—220.
209. *Овечкина Т. Г., Вахтанова Л. Н., Груз Э. А.* и др.— ЖНиПФиК, 1976, **21**, № 5, с. 382—384.
210. *Масленкова И. Г., Петренко А. С., Кириллов Н. И., Гапоненко И. Е.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 110—114.
211. *Бутусов М. М., Туркевич Ю. Г.*— ЖНиПФиК, 1971, **16**, № 5.
212. *Бондарчук В. М., Рывкин Ю. В., Телятникова М. П.*— Техн. кино и телевидения, 1975, № 10, с. 23—27.
213. *Гороховский Ю. Н., Ломанченкова Т. А.*— Междунар. конгр. по фотографич. науке (Москва, 1970): Тезисы докл. Секция Д. М.: Внешторгиздат, 1970, с. 163—166.
214. *Berg W.* Konf. theory tecnol. procez photogr. Zakopane, 1968, с. 4. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1969, № 29, с. 8—16.)
215. *Гороховский Ю. Н., Левенберг Т. Н.* Общая сенситометрия. М.: Искусство, 1965.
216. *Андреев Ю. С., Пташенчук В. М., Тарновецкий В. В., Гапоненко И. Е.*— В кн.: Проблемы голографии.— МИРЭА, 1973, вып. III, с. 133—137.
217. *Шашлов Б. А.* Теория фотографического процесса. М.: Книга, 1971.
218. *Ковачев М. И.*— Матер. III Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972, с. 339.
219. *Кириллов Н. И.* Химический контроль в процессе проявления. М.: Госкиноиздат, 1945.
220. *Золотницкий Д. М.* Контроль процессов обработки кинопленки. М.: Искусство, 1967.
221. *Кириллов Н. И.* Фиксирование и промывка светочувствительных материалов. М.: Госкиноиздат, 1947.
222. *Дерстуганов Г. В.*— ЖНиПФиК, 1956, **1**, № 3, с. 200—205.
223. *Ермолаев М. М., Михайлова Е. И.*— Опт.-мех. пром-сть, 1973, № 10, с. 27—29.
224. *Андреев Ю. С., Прусс П. Х.*— Труды НИКФИ, 1972, вып. 65, с. 115—123.
225. *Гапоненко И. Е., Андреев Ю. С.*— В кн.: Проблемы голографии. МИРЭА, 1973, вып. III, с. 142—145.
226. *Денисюк Ю. Н., Суханов В. И., Андреева О. В.*— Опт.-мех. пром-сть, 1970, **37**, № 2, с. 29—31.
227. *Bidermann K.*— Optik, 1970, **31**, N 4, S. 367—389. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1970, № 40, с. 1—15).
228. *Bidermann K.*— Optik, 1975, **14**, N 9, S. 2260—2266. (Реф.: Экспресс-информ. ВИНИТИ. Фотокиноаппаратура. Науч. и прикл. фотогр., 1975, № 45, с. 8—18).
229. *Гирина М. Г., Соболев Г. А.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 88—98.
230. *Соболев Г. А., Кириллов Н. И.*— Междунар. конгресс по фотографической науке (Москва, 1970): Тезисы докл. М.: Внешторгиздат, 1970, секция А, с. 159—162.
231. *Броун Ж. Л., Сагариц В. А., Карнаух Т. В.*— В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975, с. 86—88.
232. *Блюмберг И. Б.* Технология обработки кинофотоматериалов. М.: Искусство, 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1

Голография и ее применение

1.1. Общие сведения 4
1.2. Способы голографирования 7
1.3. Регистрирующие (светочувствительные) среды для голографии 11
1.4. Применение голографии и ее методов 17

Глава 2

Галогенидосеребряные высокоразрешающие фотоматериалы для голографии

2.1. Общие данные 19
2.2. Дисперсионные и резольвометрические характеристики 22
2.3. Фотографическая и голографическая светочувствительность, сенситометрические показатели 29
2.4. Содержание серебра, толщина эмульсионного слоя и другие требования 40
2.5. Требуемый и существующий ассортимент высокоразрешающих фотоматериалов для голографии 45

Глава 3

Обработка высокоразрешающих фотоматериалов для голографии

3.1. Общая характеристика 53
3.2. Предварительная обработка фотоматериалов 55
3.3. Обработка фотоматериалов при голографировании в сходящихся пучках 60
3.4. Обработка фотоматериалов при голографировании во встречных пучках 71
3.5. Получение фазовых (отбеленных) голограмм 83
3.6. Обработка готовых голограмм 94
3.7. Проявочное оборудование для обработки голограмм . . 98

Глава 4

Оценка качества голографических фотоматериалов и контроль процессов их обработки

4.1. Общая характеристика методик испытания голографических фотоматериалов 101
4.2. Общесенситометрические и спектросенситометрические испытания 103
4.3. Структурные свойства 107
4.4. Химико-аналитические, физико-химические и физико-механические испытания 115
4.5. Голографические характеристики 118
4.6. Контроль процесса обработки голографических фотоматериалов 124

Литература 126

Николай Иванович Кириллов

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ФОТОМАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ И ПРОЦЕССЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Утверждено к печати Ордена Ленина Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе, Научным советом по проблеме «Голография»

Редактор *А. А. Протащик.* Редактор издательства *Л. Е. Кононенко*
Художник *В. А. Кобрин.* Художественный редактор *Т. П. Поленова*
Технические редакторы *Е. Н. Евтянова, С. Г. Тихомирова*
Корректоры *Л. И. Харитонова, Г. Н. Лащ*

ИБ № 8515

Сдано в набор 08.05.79. Подписано к печати 22.08.79.
Т-01787. Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Гарнитура обыкновенная Печать высокая
Усл. печ. л. 7,14 Уч.-изд. л. 7,5 Тираж 2550 экз. Тип. зак. 1940
Цена 75 коп.

Издательство «Наука» 117485 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10